



Gobierno  
de Chile

**GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

# **PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS VERTIENTES DEL ATLÁNTICO**

## **ANEXO F – ASPECTOS METODOLÓGICOS DEL PLAN DE CUENCAS**

**REALIZADO POR:**

UTP HIDRICA CONSULTORES SPA Y RUBIO CARTES Y MEZA  
INGENIEROS CONSULTORES LTDA (UTP HIDRICA - ERIDANUS)

**S.I.T. N° 492**

**Santiago, diciembre 2021**

## CONTENIDO

1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES	1
1.3	ALCANCES GENERALES DEL ESTUDIO	1
1.3.1	Descripción de la cuenca. Localización geográfica	1
1.3.2	Diagnóstico de la cuenca	2
1.3.3	Modelación hidrológica	2
1.3.4	Participación Ciudadana	2
1.3.5	Formulación del Plan de Acción	2
1.3.6	Generación del SIG	2
2.1	RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	3
2.2	RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE	3
2.2.1	Antecedentes relativos a modelación	3
2.2.2	Antecedentes relativos a PAC	4
2.2.3	Antecedentes relativos a carteras de acciones	4
3.1	INTRODUCCIÓN	6
3.2	METODOLOGÍA APLICADA EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	7
3.2.1	Dimensión física y económica	7
3.2.2	Clima	10
3.2.3	Dimensión ambiental	18
3.2.4	Infraestructura	25
3.2.5	Nuevas fuentes de agua	26
3.2.6	Gobernanza	26
3.2.7	Cartera de acciones	27
3.3	METODOLOGÍA APLICADA EN LA DEMANDA FÍSICA Y LEGAL DE RECURSOS HÍDRICOS PARA DIFERENTES USOS	29
3.3.1	Estimación de demanda hídrica actual y proyección futura	29
3.3.2	Análisis de DAA y mercado de DAA	34
3.4	METODOLOGÍA APLICADA EN LA OFERTA HÍDRICA	38
3.4.1	Fuentes	38
3.4.2	Oferta en la fuente (aguas superficiales)	41
3.4.3	Stock, recarga y niveles (aguas subterráneas)	41
3.4.4	Calidad de las aguas	41
3.4.5	Fuentes de contaminación	46
3.4.6	Derechos concedidos	46
3.5	METODOLOGÍA APLICADA EN LA MODELACIÓN Y EL BALANCE DE AGUA	47
3.5.1	Descripción de la Plataforma WEAP	47
3.5.2	Descripción de MODFLOW	58
3.5.3	Acople WEAP-MODFLOW	62
3.5.4	Forzantes meteorológicas utilizadas	72
3.5.5	Balance Anual y Oferta Sustentable	74
3.5.6	Análisis de Criterios de Sustentabilidad de Acuíferos	75

3.5.7	Indicadores Hídricos de la Cuenca	77
3.6	METODOLOGÍA APLICADA EN EL ANÁLISIS DE ACCIONES	82
3.6.1	Ejes del Plan de Acción	82
3.6.2	Árboles de problemas y soluciones	82
3.6.3	Medidas de intervención	84
3.6.4	Categorización de las acciones del Plan	85
3.7	METODOLOGÍA APLICADA EN LA CARTERA DE INICIATIVAS PROPUESTAS	88
3.7.1	Síntesis de la selección de alternativas	88
3.7.2	Metodología para la evaluación y priorización de medidas	88
3.7.3	Valorización económica del PEGH	96
3.7.4	Metodología para la generación del cronograma de las soluciones	96
3.8	METODOLOGÍA APLICADA EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN	96
3.8.1	Hitos de referencia en la implementación del plan	96
3.8.2	Estrategia de implementación	96
3.8.3	Estrategia de comunicación	97
3.8.4	Identificación de fuentes de financiamiento del Plan	97
3.9	METODOLOGÍA APLICADA EN EL MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL PLAN	97
3.9.1	Programa de seguimiento y control del Plan	97

## TABLAS

Tabla 2.2-1	Resumen de modelos existentes actualizados.....	3
Tabla 2.2-2	Listado de antecedentes relevantes de PAC.....	4
Tabla 2.2-3	Listado de fuentes de información relevantes asociadas a carteras de acciones o medidas en materia hídrica .....	5
Tabla 3.2-1	Eventos y su definición .....	11
Tabla 3.2-2	MCG seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático en (DGA, 2017a) .....	13
Tabla 3.2-3	Resumen de las variaciones porcentuales de precipitación y escorrentía para distintas cuencas estudiadas en (DGA, 2019a). .....	17
Tabla 3.2-4	Valores de precipitación y temperatura promedio para el periodo histórico y futuro. ....	17
Tabla 3.2-5	Escenarios de cambio climático modelados .....	18
Tabla 3.2-6	Clasificación de los Servicios Ecosistémicos según Potschin & Haines-Young (2011).....	22
Tabla 3.3-1	Tabla de equivalencia de requerimientos de agua para producción pecuaria .....	31
Tabla 3.3-2	Coeficientes de cultivo según cobertura de suelo .....	33
Tabla 3.4-1	Parámetros considerados en el diagnóstico del estado de calidad .....	44
Tabla 3.4-2	Rangos límites de parámetros CE y SDT .....	46
Tabla 3.5-1	Variables y parámetros utilizados por el modelo WEAP .....	54
Tabla 3.5-2	Parámetros de acuífero en WEAP.....	56
Tabla 3.5-3	Atributos Archivo de Enlace WEAP - MODFLOW. ....	69
Tabla 3.5-4	Estadígrafos calibración modelo subterráneo.....	72
Tabla 3.5-5	Estaciones seleccionadas como "indicadoras" para las cuencas Vertientes del Atlántico.....	73
Tabla 3.5-6	Valores del índice de precipitación estandarizado.....	77
Tabla 3.5-7	Probabilidad de recurrencia. ....	78
Tabla 3.6-1	Ejes de formulación del PEGH .....	82
Tabla 3.6-2	Ficha resumen identificativa de las acciones del plan.....	87
Tabla 3.7-1	Escala de evaluación económica: indicador de CAE normalizado.....	90
Tabla 3.7-2	Escala de evaluación social: indicador de problemáticas PAC .....	90
Tabla 3.7-3	Escala de puntuación para evaluación ambiental.....	91

## FIGURAS

Figura 3.1-1	Mapa conceptual de la metodología aplicada .....	6
Figura 3.2-1	Cambios en la precipitación anual media, proyectado hacia 2030-2060 respecto de LB 1985-2015 para cada MCG.....	15
Figura 3.2-2	Cambio relativo en precipitación media anual proyectada para el período proyectado para el período futuro (2030-2060) respecto al período de línea base (1985-2105), promediado sobre un conjunto de cuencas con información fluviométrica (CAMELS-CL).....	16
Figura 3.2-3	Cascada de los Servicios Ecosistémicos basada en Potschin & Haines-Young (2011) .....	20
Figura 3.3-1	Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Pecuario.....	30
Figura 3.3-2	Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de protección ambiental.....	33
Figura 3.4-1	Áreas protegidas chilenas y su grado de homologación de UICN .....	40
Figura 3.4-2	Ejemplo de Diagrama de Piper .....	43
Figura 3.4-3	Ejemplo de Diagrama de Stiff .....	43
Figura 3.4-4	Esquema de un Diagrama Box-Whiskers.....	45
Figura 3.5-1	Elementos y métodos disponibles en WEAP para la modelación de la hidrología, demandas de agua y agua subterránea.....	51
Figura 3.5-2	Esquema gráfico modelo WEAP .....	53
Figura 3.5-3	Modelo Conceptual del acuífero en WEAP. Fuente: Manual WEAP .....	56
Figura 3.5-4	Esquema de Vinculación WEAP-MODFLOW Mediante Archivo de Enlace .....	63
Figura 3.5-5	Esquema General Metodología de Elaboración de Modelos Acoplados ....	64
Figura 3.5-6	Esquema para Generación de Archivos en Formato Nativo MODFLOW ...	67
Figura 3.5-7	Modificación de Archivos Nativos GWV .....	68
Figura 3.5-8	Transformación de distribución mixta a distribución normal estándar....	79
Figura 3.5-9	Transformación de distribución mixta a distribución normal estándar....	79
Figura 3.6-1	Esquema de árbol de problemas y soluciones.....	83
Figura 3.7-1	Esquema de priorización de las acciones.....	95

## **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DEL ESTUDIO**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

La DGA es el organismo del Estado en Chile encargado de promover la gestión y administración del recurso hídrico, en un marco de sustentabilidad, interés público y asignación eficiente del agua para el consumo humano, producción de bienes y servicios y la conservación del medio ambiente. Actualmente, en un contexto en que la seguridad hídrica y la eficiencia en la gestión del recurso hídrico se imponen como menester, la planificación en esta materia debe tener un enfoque estratégico.

El PEGH de las cuencas Vertientes del Atlántico, promovido por la DGA, compila un portafolio de acciones a diferentes horizontes (corto, mediano y largo plazo), dirigido a los diferentes servicios públicos y actores privados que participan de la gestión del agua, con énfasis en aquellas sobre las que recae la responsabilidad en la propia DGA. El PEGH es una hoja de ruta a través de la cual se aspira a hacer frente a la problemática hídrica de las cuencas Vertientes del Atlántico, con una visión integrada de las relaciones entre los actores en torno al uso, consumo y gestión del recurso hídrico, teniendo presente los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua.

### **1.2 ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES**

El presente Anexo presenta las directrices metodológicas seguidas durante el estudio, abordando los siguientes aspectos y detallados en los capítulos sucesivos:

- Revisión y análisis de antecedentes compilados a lo largo del estudio (Capítulo 2).
- Enfoque metodológico del estudio, considerando aspectos relativos a la caracterización y diagnóstico de la cuenca, procesos aplicados en el modelo hidrológico superficial-subterráneo, metodología ejecutada en el desarrollo de las actividades PAC, descripción metodológica de evaluación de las iniciativas del Plan, y finalmente, bases seguidas en la generación del SIG (Capítulo 3).

### **1.3 ALCANCES GENERALES DEL ESTUDIO**

A continuación, se especifican los alcances generales del estudio.

#### **1.3.1 Descripción de la cuenca. Localización geográfica**

Según lo establecido en las Bases Técnicas del estudio, la descripción de la cuenca consiste en una recopilación de antecedentes alrededor de la cuenca de estudio, con sus principales características geográficas, administrativas, económicas, sociales, y otros aspectos en torno al recurso hídrico y su gestión actual.

El presente estudio tiene alcance a nivel de cuenca; específicamente, se estudian las cuencas Vertientes del Atlántico, en la región de Magallanes y la Antártica Chilena. BNA N° 126 "Vertientes del Atlántico" y con los límites establecidos en la cuenca DARH N° 1210 "Cuencas Fronterizas Vertiente Atlántica". En el acápite 3.2 del presente Anexo F

se presenta mayor detalle de la metodología aplicada en la caracterización de la cuenca.

### **1.3.2 Diagnóstico de la cuenca**

Atendiendo a los objetivos específicos del estudio, se elabora el diagnóstico de la cuenca, atendiendo a los siguientes contenidos:

- Oferta y demanda de agua, actual (2020) y futura (años 2030 y 2050);
- Infraestructura en materia hídrica;
- Institucionalidad y gobernanza; y
- Cartera de acciones, tanto públicas como privadas.

En el presente Anexo F se expone la metodología aplicada para analizar cuantitativa y/o cualitativamente cada uno de los ítems expuestos anteriormente, de forma de tener una "radiografía" de la cuenca de estudio en los puntos indicados, en los acápites 3.2 (infraestructura, gobernanza, entre otros), 3.3 (demanda de agua), 3.4 (oferta de agua).

### **1.3.3 Modelación hidrológica**

La modelación hidrológica, en el presente estudio, pretende alcanzar una herramienta que permita visualizar la dinámica de los flujos superficiales y subterráneos de la cuenca de estudio, a partir de los modelos numéricos existentes y facilitados por la DGA. Mayor detalle del procedimiento de construcción y actualización del modelo se entrega en el acápite 3.5.

### **1.3.4 Participación Ciudadana**

La metodología aplicada antes, durante y después de la realización de las actividades PAC, las cuales consisten en entrevistas y reuniones con actores relevantes de la cuenca, y que pretenden retroalimentar el diagnóstico y brindar información sobre problemáticas reales; y talleres, con la finalidad, entre otras, de analizar potenciales soluciones en la zona de estudio, se compila en el Anexo I.9 del presente estudio.

### **1.3.5 Formulación del Plan de Acción**

El Plan de Acción tiene como alcance la elaboración de un portafolio con acciones o iniciativas enfocadas en la resolución de las principales brechas y/o problemáticas detectadas en el diagnóstico y reuniones PAC, apoyándose, en caso posible, en el modelo numérico para establecer posibles escenarios de gestión. El PEGH está dirigido tanto a la DGA como a otras instituciones que tengan relación con la materia hídrica de la cuenca. La metodología se detalla en los acápites 3.6 al 3.9.

### **1.3.6 Generación del SIG**

El proyecto SIG tiene como principales objetivos el generar cartografía de apoyo y hacer análisis espaciales los cuales se ven reflejados en el informe principal y en las coberturas presentadas en la Geodatabase. Todo el detalle del SIG generado y su metodología se encuentra en el Anexo G del presente estudio.

## **CAPÍTULO 2 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES**

La recopilación de antecedentes se enfocó en la búsqueda y el análisis de antecedentes de estudios bibliográficos y otros soportes digitales relativos al objetivo del estudio. Específicamente, lo anterior se aplicó a los antecedentes establecidos en las Bases Técnicas del estudio, complementándose con otros de interés, con foco en estudios propios de las cuencas Vertientes del Atlántico.

### **2.1 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS**

Los antecedentes revisados y que han sido consultados en el desarrollo del presente estudio son aquellos compilados en el Anexo E; a cada uno de ellos se le ha realizado una ficha resumen con los principales resultados de interés referentes al objetivo del estudio, las que pueden ser consultadas en el mencionado anexo.

### **2.2 RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE**

A partir del análisis realizado durante la generación de las fichas resumen de los antecedentes, y de acuerdo a los objetivos del estudio, se establecieron los principales ejes de interés para la selección de la información relevante: modelación, participación ciudadana y cartera de acciones.

A continuación, se presenta un resumen de los principales antecedentes según la clasificación anterior.

#### **2.2.1 Antecedentes relativos a modelación**

Inicialmente se debe indicar un breve resumen de los antecedentes clave para la actividad asociada a la modelación hidrológica. Lo anterior consiste, básicamente, en recopilar los modelos base y sus correspondientes estudios e informes que fueron considerados como base para el modelo del estudio.

La Tabla 2.2-1 presenta un resumen del levantamiento de modelos actualizados para la cuenca objeto de estudio.

**Tabla 2.2-1 Resumen de modelos existentes actualizados**

<b>Tipo modelo</b>	<b>Software</b>	<b>Autor/Elaborado por</b>	<b>Fecha</b>
Subterráneo	GWV	ARCADIS	2016

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la componente superficial, se elaborará un nuevo modelo implementado en el software WEAP.

Entre los estudios en esta cuenca donde se desarrollaron modelos numéricos se encuentra únicamente el modelo desarrollado en el estudio "Actualización de información y Modelación Hidrológica Acuíferos de la XII Región, De Magallanes y la

Antártica” (DGA, 2016a). En el Subanexo H-1 se presenta un resumen de la existencia de antecedentes de modelación en la cuenca.

### 2.2.2 Antecedentes relativos a PAC

Como conclusión al proceso de revisión de antecedentes relativos a procesos de participación ciudadana, cabe señalar que, de los informes de las cuencas Vertientes del Atlántico, se destacan los listados de los actores sociales que han participado en las diversas iniciativas revisadas. Así mismo, también es de utilidad las metodologías utilizadas para el levantamiento de la información, tanto en talleres como entrevistas a directores y actores relevantes.

Respecto los antecedentes relevantes en aspectos de PAC, en la Tabla 2.2-2 se muestran los principales estudios con dicha componente. El número de referencia, corresponde al orden según Tabla N°1 del Anexo E del presente estudio, donde dichos antecedentes han sido recopilados, analizados y resumidos en fichas.

**Tabla 2.2-2 Listado de antecedentes relevantes de PAC**

Ref	Documento	Año	Elaborado por	Autor
9	Análisis crítico de las redes hidrométricas. Zona Sur. Informe Final	2014	Sociedad de Servicios Profesionales en Recursos Hídricos y Medio Ambiente Ltda	DGA
-	Estudio básico diagnóstico para desarrollar Plan de riego en región de Magallanes: informe final.	2017	Aquasys Ingenieros Consultores	CNR
15	Diagnóstico nacional de Organizaciones de Usuarios (OUA).	2018	Laboratorio de Análisis Territorial, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile	DGA

Fuente: Elaboración propia.

De los diferentes documentos revisados para las cuencas Vertientes del Atlántico, destacan los listados de actores en el territorio, presentes en los documentos correspondientes al Plan de Riego para la región de Magallanes, así mismo este documento entrega información importante relativa a zonas con déficit hídrico y zonas con potencial de riego, las observaciones ciudadanas de actores públicos y privados.

Por otra parte, el documento de análisis de la red hidrométrica, señala observaciones relativas a temáticas técnicas que se condicen con aquellas plasmadas en el Plan de Riego, como lo es la deficiencia en las fiscalizaciones.

En el Anexo I.1 se adjunta el análisis crítico de antecedentes respecto PAC en las cuencas Vertientes del Atlántico.

### 2.2.3 Antecedentes relativos a carteras de acciones

Dentro de la revisión de antecedentes, se ha prestado especial atención a aquellos Planes y Estudios existentes que plantearon iniciativas, acciones o medidas en materia hídrica en la cuenca de estudio, sin embargo, no existen antecedentes que incluyan

cartera de acciones para las cuencas Vertientes del Atlántico. Ha sido considerada también la información que ha dispuesto el Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MIDESO) a través del portal del Banco Integrado de Proyectos (BIP). En la Tabla 2.2-3 se presenta un resumen de las principales fuentes consideradas. El número de referencia, corresponde al orden según Tabla N°1 del Anexo E del presente estudio, donde dichos antecedentes han sido recopilados, analizados y resumidos en fichas.

**Tabla 2.2-3 Listado de fuentes de información relevantes asociadas a carteras de acciones o medidas en materia hídrica**

<b>Ref</b>	<b>Fuente de información</b>	<b>Año</b>	<b>Institución o Empresa</b>
n/a	Banco Integrado de Proyecto (BIP)	2021	MIDESO

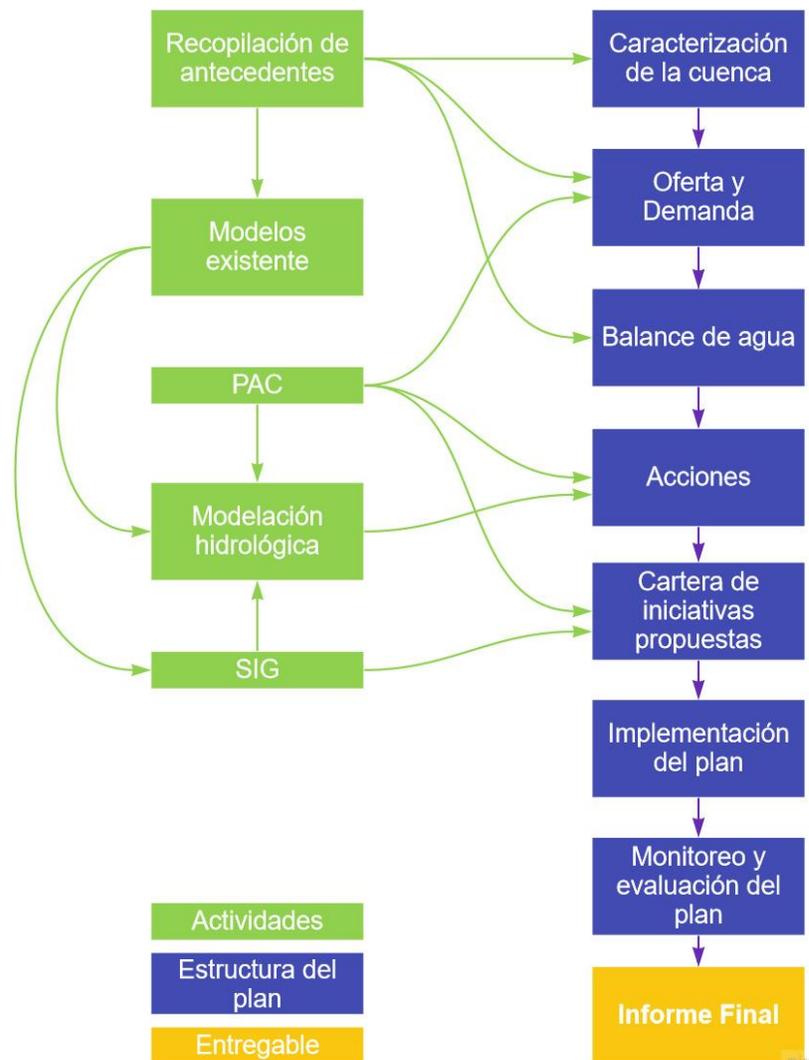
Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la información contenida en el BIP, esta considera las iniciativas de diversas instituciones formuladoras tales como: Comisión Nacional de Riego (CNR), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), Seremi de Vivienda, Servicio de Agua Potable Rural, entre otras.

## CAPÍTULO 3 ENFOQUE METODOLÓGICO DEL ESTUDIO

### 3.1 INTRODUCCIÓN

La base metodológica del presente estudio ha considerado el análisis de múltiples trabajos anteriores e información disponibles. En la Figura 3.1-1 se presenta un mapa conceptual de los temas abordados, con la finalidad de formular el Plan de Acción de la cuenca, presentando las relaciones metodológicas de las temáticas de análisis aplicadas en el estudio.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.1-1 Mapa conceptual de la metodología aplicada**

Seguidamente, se presentan los aspectos metodológicos aplicados en las diferentes componentes contempladas en el estudio según lo indicado en las Bases Técnicas.

## **3.2 METODOLOGÍA APLICADA EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA**

La metodología aplicada para elaborar la caracterización de las cuencas Vertientes del Atlántico se ha basado íntegramente en el análisis de los antecedentes de estudios disponibles. Mayor detalle sobre éstos se compila en el Anexo E, en el que se adjunta una serie de fichas resumen, las cuales han sido de utilidad al momento de compilar y sintetizar la información relativa a la caracterización de la cuenca. Las referencias bibliográficas que sustentan la información se presentan en el Anexo B.

### **3.2.1 Dimensión física y económica**

#### **3.2.1.1 Geomorfología**

Con el objetivo de caracterizar la geomorfología de las cuencas Vertientes del Atlántico se utilizaron fuentes de información secundaria vinculada a la materia. Entre estas fuentes se encuentra la Dirección General de Aguas (DGA) y la Comisión Nacional de Riego (CNR).

La información contenida en las fuentes antes señaladas fue complementada con la capa "unidades\_geomorfologicas" en formato vectorial (SHP) desarrollado por la Universidad de la Frontera (UFRO). La información presentada considera una representación cartográfica de la geomorfología de la cuenca.

#### **3.2.1.2 Geología**

Con el objetivo de caracterizar la geología de las cuencas Vertientes del Atlántico, se utilizaron fuentes de información secundaria vinculada a la materia. Entre estas fuentes se encuentra la Dirección General de Aguas (DGA), La Corporación Nacional Forestal (CONAF), Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y estudios geológicos relacionados a la cuenca estratigráfica de Magallanes (Peña, 2009; Wenzel, 1951).

#### **3.2.1.3 Suelos**

Con el objetivo de caracterizar los suelos presentes en las cuencas Vertientes del Atlántico se utilizó la Base de Datos armonizada de Los Suelos del Mundo (HWSD, por sus siglas en inglés) disponible en el portal web de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) <http://www.fao.org/home/en/>.

La Base de Datos armonizada de Los Suelos del Mundo consiste en una base de celdas de 30 arcosegundos incluyendo más de 15000 unidades cartográficas de suelo a lo que armoniza actualizaciones regionales y nacionales de información de suelos del mundo (SOTER, ESD, Mapa de Suelos de China, WISE) con la información contenida entre la escala de 1:5000 00 del Mapa Mundial de Suelos de la FAO-UNESCO (FAO, 1971-1981).

La base de datos compilados de ráster consiste en 21600 filas y 43200 columnas, estas se entrelazan a datos de propiedades de suelo armonizados. El uso de esa estructura permite la asociación de los datos de atributo con el mapa ráster para su

ilustración o consultar la estructura en términos de unidades de suelo y la caracterización propiedades del suelo seleccionadas.

Para la clasificación de los suelos presentes en las cuencas Vertientes del Atlántico se utilizó el área que comprende las cuencas DARH.

De manera adicional se hace una descripción de los suelos a partir de una fuente de información secundaria vinculada a la materia, correspondiente al libro "Suelos de Chile" de Walter Luzio (Luzio, 2010).

#### **3.2.1.4 Drenaje**

Con el objetivo de caracterizar la red de drenaje superficial, presente en las cuencas Vertientes del Atlántico, se utilizó la capa "fuentes\_nacional" en formato vectorial (SHP) proporcionada por la DGA. Esta información fue complementada con fuentes secundarias vinculadas a la materia. Lo anterior, a fin de reconocer los tributarios y cuerpos de agua más relevantes presentes en la cuenca.

A partir del cruce entre las fuentes de información antes mencionadas se realizó un diagrama unifilar general de las cuencas Vertientes del Atlántico, en donde se representan los principales cursos y cuerpos de agua presentes en ella.

#### **3.2.1.5 División político-administrativa**

La delimitación política-administrativa ha sido reconocida a partir de la capa "COMUNAS\_2020" que ha dispuesto la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo en el centro de descarga IDE Chile y la capa "Subcuencas\_DARH" de la Dirección General de Aguas. A partir de ambas fuentes se identificó la comuna en la cual se inserta la cuenca y la superficie en porcentaje que abarca la cuenca respecto de las comunas atingentes.

#### **3.2.1.6 Demografía**

Con el objetivo de describir las características sociodemográficas de los habitantes de la cuenca, se realiza una identificación y caracterización de la población, a partir de los datos del Censo de Población y Vivienda 2017 (INE, 2017b).

Para lo anterior, se utilizan los registros shapefile proporcionados por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) sobre la población efectivamente censada; a partir de estas, se realiza la selección de manzanas urbanas y entidades rurales para cada comuna, dentro de los límites de la cuenca. En el caso de que parte de las entidades o manzanas queden geográficamente fuera de la cuenca, se divide el objeto mediante la intersección con la cobertura de cuenca y, a continuación, se pondera la población total de la entidad con las nuevas áreas generadas. Finalmente, el número de habitantes estimado anteriormente, se modifica de acuerdo a la ubicación de asentamientos observados en imágenes satelitales, proporcionadas por el software Google Earth© (última visita: 10 de marzo de 2021) y según el tipo de localidad de acuerdo a su clasificación INE: aldea (entre 301 y 1000 habitantes), caserío (menor a 301 habitantes), asentamiento minero (zona de alta

productividad), entre otros. La identificación espacial y los datos poblacionales registrados por el censo, permiten determinar la distribución territorial y el número de habitantes por comuna que habita al interior de la cuenca.

La proyección de la tasa de crecimiento poblacional se basó en la metodología utilizada en el trabajo "Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile" (DGA, 2017b) para la proyección de demanda de clientes de agua potable urbana, en la cual, se extraen desde las proyecciones del INE las tasas de crecimiento poblacional regional para el periodo analizado (2017 - 2035), y se calcula la población comunal dentro de la cuenca, año a año, utilizando como punto de partida, el número de habitantes resultantes de la metodología presentada en el párrafo anterior. Las tasas registradas, se proyectan utilizando una tendencia exponencial hasta el año 2050, mediante la función "CRECIMIENTO" de Excel. Una vez obtenidas las tasas anuales de crecimiento proyectadas, estas son aplicadas al número de habitantes por comuna estimados y así se obtiene el número de habitantes dentro de la cuenca a los años 2020, 2030 y 2050.

La información referente a densidad de población, distribución por edad y nivel educacional, se sintetizó directamente de la información comunal entregada por el Censo de Población y Vivienda 2017 (INE, 2017a).

### **3.2.1.7 Actividad económica**

La identificación de las actividades económicas de interés para la cuenca y la gestión de recursos hídricos, se realizó a partir de los registros históricos del Producto Interno Bruto (PIB) regional, los que se obtuvieron desde la base de datos estadísticos en línea del Banco Central (BC, 2021). URL: [en línea] <<https://si3.bcentral.cl/>> [consulta: 23 mar. 2021].

Asimismo, los niveles de empleabilidad regionales y por actividad económica se extrajeron desde el repositorio de datos estadísticos en línea, administrado por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2021b). URL: [en línea] <<https://stat.ine.cl/>> [consulta: 23 mar. 2021].

La información pertinente a las exportaciones regionales, se obtuvo desde los boletines informativos "Exportaciones", generados por INE Regiones, correspondiente al periodo de MAYO 2021 (INE, 2021a).URL: [en línea] <<https://regiones.ine.cl/>> [consulta: 14 junio. 2021]

Para la caracterización de las actividades económicas de importancia se utilizaron los siguientes antecedentes:

- **Actividad minera:**

- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), 2019. Anuario de la minería de Chile [en línea] <<https://.sernageomin.cl/>> [consulta: 14 junio. 2021].

- **Actividad silvoagropecuaria:**

- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), 2021. Ficha de la región de Magallanes y de la Antártica Chilena. [en línea] <<https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl>> [consulta: 14 junio. 2021].
- Entrevistas y reuniones de Participación Ciudadana realizada durante el presente estudio.

### **3.2.2 Clima**

#### **3.2.2.1 Caracterización climática**

Con el objetivo de caracterizar el clima en la cuenca se utilizó la capa "Koppen\_30\_nov\_2016" en formato vectorial (SHP) escala 1:1.500.000 que el Departamento de Geografía de la Universidad de Chile ha dispuesto en el centro de descarga IDE Chile (<https://www.ide.cl/>). Dicho mapa, representa los 25 tipos de clima que posee Chile según Sarricolea et al. (2017) usando la clasificación climática de Köppen-Geiger, en formato shapefile, y realizado sobre cubiertas de temperatura y precipitación mensual de 1 km<sup>2</sup> de resolución. La precipitación (pp) representa el promedio de precipitación por el tipo en toda su distribución espacial, al igual que la temperatura. La altitud (min y máx) son los extremos altitudinales en que se sitúa el tipo climático. Para los fines de este estudio, el análisis fue limitado al área que comprenden las cuencas Vertientes del Atlántico.

Por otro lado, como explica la ejecución del SubAnexo H-2 de Diagnóstico Meteorológico, la cuenca en estudio posee registros de clima vigentes que sirven para efectos de caracterización climática.

Por ende, la caracterización se hizo en dos fases: (i) mediante la validación del clima en estaciones cercanas y (ii) con la extracción de las forzantes validadas y actualizadas a través de los productos meteorológicos disponibles. Se incluyó al análisis el ajuste del sesgo para la precipitación.

En este sentido, las forzantes meteorológicas consideradas hasta el año 2015 corresponden a las forzantes de la Etapa IV de la actualización del Balance Hídrico (DGA, 2019a), y que fueron extendidas con el producto CR2MET 2.0 del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para el período 2016-2020.

Con esta información completada se procedió a agregar espacialmente la precipitación y temperatura a nivel de subsubcuenca, de acuerdo a los puntos de salida asociado a cada estación fluviométrica. La razón de incluir distintas subsubcuencas fue resaltar la variabilidad de los resultados y la consistencia de las forzantes a nivel espacial.

### 3.2.2.2 Eventos extremos y variabilidad climática

#### i. Eventos extremos

Para el análisis de este punto es necesario establecer qué eventos se consideran dentro del análisis, seguido de la resolución espacial de los insumos a utilizar y el rango de tiempo a considerar, tal como se especifica más adelante.

#### 1. Eventos extremos considerados

La base de datos de referencia empleada en este estudio (LA RED, 2014) posee una lista de 36 tipos de eventos predefinidos, cuya selección se basó en la consulta no exhaustiva de diversos diccionarios y glosarios técnicos. En el presente análisis se involucraron solo 4 tipos de eventos, cuya definición queda expuesta en la siguiente Tabla, de acuerdo a lo señalado por (Grupo de Investigación OSSO y La RED, 2009).

Los 4 tipos de eventos fueron seleccionados con el fin de servir como indicadores de lo que ha sido registrado históricamente en la cuenca en materia de exceso hídrico. Para que dichos eventos hayan sido parte de la base de datos, fue necesario que: (i) el desencadenante del evento haya superado un determinado umbral, (ii) exista(n) persona(s) afectada(s), y (iii) exista trabajo periodístico que informe dicha afectación.

**Tabla 3.2-1 Eventos y su definición**

<b>Evento</b>	<b>Definición</b>
Aluvión	Avenidas torrenciales con arrastre de grandes cantidades de material sólido (guijarros, gravas y bloques de rocas), aplicable a aquellas regiones secas o cauces secos en los que las lluvias ocasionales los producen.
Avenida Torrencial	Flujo violento de agua en una cuenca, a veces reportado como creciente (súbito, rápido), o como torrente. Se aplica cuando en los reportes aparece como -avalancha-, cuando la avenida transporta troncos de árboles y/o abundantes sedimentos desde finos hasta bloques de roca. Pueden ser generados por lluvias, por ruptura de represamientos o por abundantes deslizamientos sobre una cuenca. Excluye los aludes, porque éstos implican desprendimiento de hielo o nieve.
Inundación	Anegamiento o cubrimiento con agua de un terreno donde se localicen poblaciones, cultivos, bienes o infraestructura
Lluvias	Precipitación pluvial. Incluye lluvias puntuales, persistentes o torrenciales en una región específica, así como períodos largos de precipitaciones

Fuente: (Grupo de Investigación OSSO y La RED, 2009).

#### 2. Resolución espacial y periodo de análisis

La base de datos contiene 5 niveles a escala espacial para ubicar un evento determinado, los cuales se indican a continuación:

- Región: Mayor división política utilizada para caracterizar a un evento.
- Provincia: División política intermedia para caracterizar un evento.
- Comuna: División política menor utilizada.
- Sitio: Permite precisar una o varias zonas pobladas y/o infraestructuras que hayan sido afectadas.
- Coordenadas: Cuando el evento se produce en una localidad, pueblo o ciudad específica, es posible incluir coordenadas de referencia.

La información disponible en la base de datos de LA RED (LA RED, 2014) comprende el periodo 1973-2014. Para los fines del presente análisis, se revisó información de prensa en la Biblioteca Nacional de Chile, SERNAGEOMIN (2017), Urrutia & Lanza (1993) y noticias en los portales web de distintos medios de comunicación (escrita, radial, etc.), además de información nacional relacionada con desastres (SUBDERE, 2011). Además, para completar la recopilación de eventos ocurrido durante el año 2014 y extenderla hasta el año 2020, se buscó información de carácter periodístico, utilizando como fuente principal al periódico El Mercurio, el cual posee publicaciones diarias en línea. Esto permitió extender el registro de desastres hasta el periodo 1965-2020.

## **ii. Variabilidad climática**

En este punto se busca representar de manera cuantitativa y gráfica la variabilidad asociada a la precipitación, temperatura y caudales bajo escenarios de cambio climático, en comparación con el periodo histórico.

### **1. Metodología empleada**

El análisis se realiza sobre las variables de precipitación, temperatura y caudales. Para cada una se analiza el periodo histórico (1979-2015) y futuro (2030-2060), utilizando como registros las series ponderadas a escala de cuenca generadas a partir de los resultados del Balance Hídrico Nacional. La escala espacial de la información es 5 x 5 km/pixel, mientras que la escala temporal es mensual. La agregación espacial se realizó sumando la información de cada pixel y dividiendo por el total de pixeles de la cuenca. La agregación temporal anual se realizó sumando los valores mensuales para la precipitación, mientras que para la temperatura y los caudales se consideró el promedio de los valores mensuales. Los resultados incluyen:

- Gráficos de las series anual histórica y futuras (para cada modelo de circulación general, o MCG).
- Distribución de los montos anuales para el periodo futuro.
- Distribución espacial de la variable analizada para el periodo histórico y para las diferencias porcentuales proyectadas para el periodo futuro.

Luego de presentar dichos resultados, se presentan los valores promedio, desviaciones estándar y coeficientes de variación para cada variable. Se incluye adicionalmente los resultados de la prueba de correlación de Mann-Kendall (*tau* y *p-valor*) para cuantificar la tendencia de la serie anual, así como también la

significancia de esta. Cada sección finaliza con un resumen de los resultados presentados, enfocado principalmente en las proyecciones realizadas por los MCGs.

### 3.2.2.3 Escenarios de cambio climático. Selección de Modelos de Circulación General (MCG)

La selección de los modelos de circulación general (MCG) para este estudio se enmarca en la metodología empleada en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017a). De acuerdo con dicho documento los modelos que se seleccionaron para el estudio poseen 3 razones fundamentales:

1. Respuesta regional a ambos modos globales de variabilidad climática: Esto considera que también interpretan a las forzantes climáticas: El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y el Modo Anular del hemisferio Sur (SAM), ambos asociados a la precipitación.
2. Sensibilidad Climática: El grado de respuesta de los modelos antes las variaciones de temperatura y de concentraciones de CO<sub>2</sub>. Hay modelos con distintas sensibilidades.
3. Cambios regionales: Se evaluaron los cambios en las forzantes de precipitación y temperatura para el escenario RCP 8,5 en la ventana 2030-2060 respecto de la línea base. Se buscaron entonces modelos que cubrieran una gama de variaciones.

Siguiendo estos 3 criterios, 4 modelos fueron seleccionados para el estudio, los cuales se presentan en la siguiente Tabla 3.2-2. Como se puede ver, los modelos agrupan 4 condiciones de sensibilidad, desde una baja extrema hacia un alta extrema y son ejecutados por centros científicos de diversos lugares en el mundo (USA, Francia, Japón y Australia).

**Tabla 3.2-2 MCG seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático en (DGA, 2017a)**

<b>Modelo</b>	<b>Institución</b>	<b>Sensibilidad climática</b>
CSIRO-MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia	Baja Extrema
CCSM4	National Center for Atmospheric Research, USA	Baja moderada
MIROC-ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan.	Alta moderada
IPSL-CMSA-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France	Alta extrema

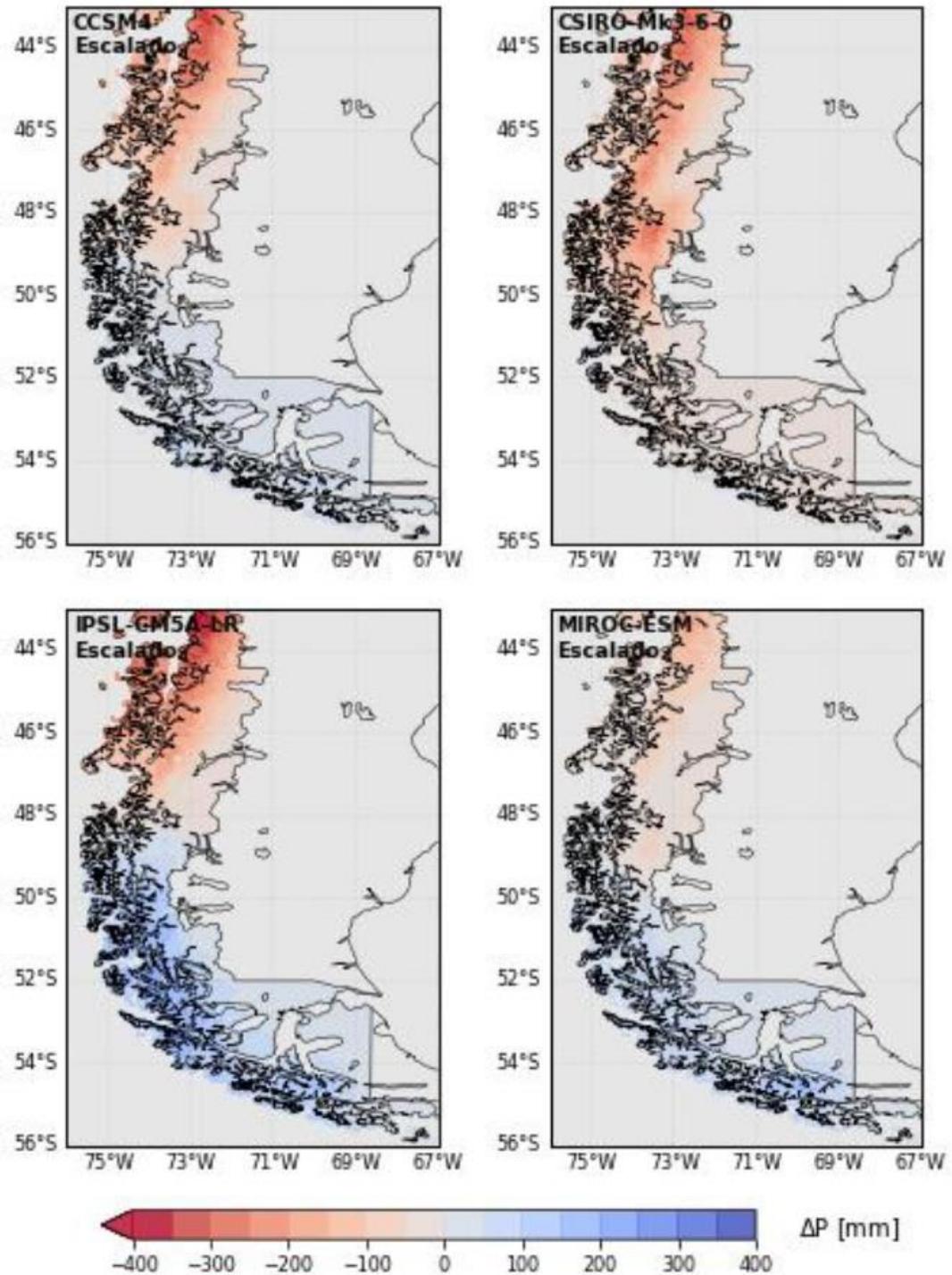
Nota: Corresponde a la Tabla 5.8 de dicho informe.

Fuente: (DGA, 2017a).

Dentro de los documentos generados en (DGA, 2019a) se encuentra el Anexo G, que resume los cambios en precipitación, temperatura y escorrentía, entre otros, para todas las cuencas "DARH" solicitadas por DGA, salvo la cuenca 1210 "Cuencas Fronterizas Vertiente Atlántica" por la discrepancia asociada a dos unidades espaciales disjuntas. Este análisis lo realiza para los 4 MCG, de manera que los tomadores de decisión sean los que evalúen que modelo utilizarán para la evaluación de políticas de gestión.

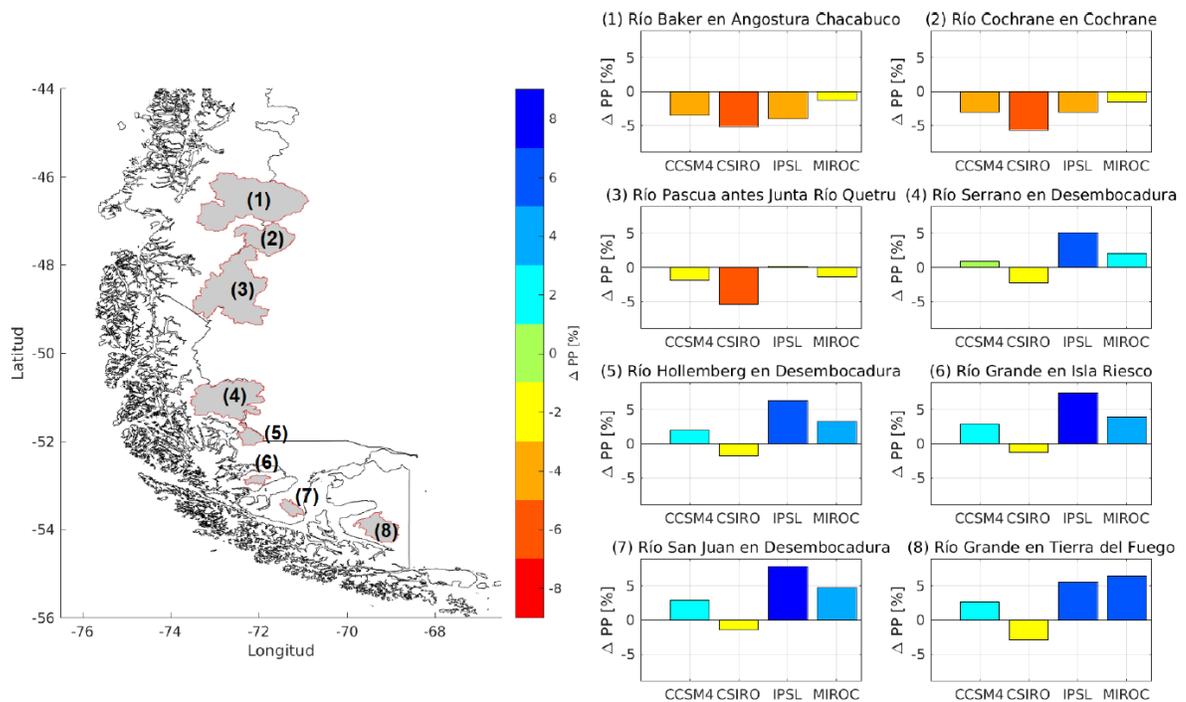
Dentro de esos resultados, se puede comentar que los cambios de precipitación más severos suelen ocurrir con los modelos IPSL y MIROC. Aunque (DGA, 2019a) agrega que los cambios son más bien homogéneos producto de que los modelos no logran reproducir del todo fenómenos locales como la influencia de la cordillera de Los Andes sobre el flujo zonal y la resultante componente orográfica de la precipitación. Además, se tiene una señal poco robusta de cambios hacia mayores precipitaciones en el extremo sur de la macro zona austral (entre 50 y 54 °S), señal que disminuye en magnitud hacia la frontera oriental de Chile y los sectores más australes en Punta Arenas y Tierra del Fuego (Figura 3.2-1).

Los cambios a nivel de cuenca son variados, observándose una inversión del signo de la señal de cambio en torno a la latitud -50 °S. Así, la variación proyectada entre modelos es robusta y aproximadamente entre -1% y -6% de precipitación para (1), (2) y (3), y de distinto signo y entre -2% y +7% aproximadamente para las cuencas (4), (5), (6), (7) y (8). En tanto, el modelo CSIRO-Mk3-6-0 proyecta solo disminuciones de precipitación en todas las cuencas seleccionadas (Figura 3.2-2).



Fuente: Figura 4.20, (DGA, 2019a).

**Figura 3.2-1 Cambios en la precipitación anual media, proyectado hacia 2030-2060 respecto de LB 1985-2015 para cada MCG**



Fuente: Figura 4.21. (DGA, 2019a).

**Figura 3.2-2 Cambio relativo en precipitación media anual proyectada para el período proyectado para el período futuro (2030-2060) respecto al período de línea base (1985-2105), promediado sobre un conjunto de cuencas con información fluviométrica (CAMELS-CL)**

Por tanto, se debe entender que cada cuenca representa un sistema único donde el comportamiento de los modelos MCG escogidos por (DGA, 2017a) pueden tener proyecciones muy distintas dependiendo de la ubicación geográfica en que éstos se encuentren. Adicionalmente a esto, se debe superponer el hecho de que la elección del MCG debe ser compatible con el modelo acoplado, particularmente, debe permitir operar el modelo hasta el año 2050, asegurando su convergencia numérica.

Por este motivo, se analizaron los resultados de la modelación hidrológica de la Actualización del Balance Hídrico Nacional; de acuerdo a lo indicado en esta metodología. Conforme al análisis, se seleccionarán dos escenarios de cambio climático a implementarse en el modelo numérico acoplado; considerando las menores variaciones de precipitación y escorrentía para la cuenca estudiada.

La Tabla 3.2-3 presenta un resumen de las variaciones estimadas de precipitación y escorrentía para las cuencas DARH que se presentan en el Anexo G de (DGA, 2019a).

**Tabla 3.2-3 Resumen de las variaciones porcentuales de precipitación y escorrentía para distintas cuencas estudiadas en (DGA, 2019a).**

Modelo MCG	CSIRO-MK3.6		CCSM4		MIROC-ESM		IPSL-CM5A-LR	
	D Pp	D Esc						
Cuenca/Ventana	30-60; 85-15							
Punta Arenas	-2%	-5%	2%	-1%	3%	4%	7%	9%
Tierra del Fuego	-2%	-1%	3%	6%	6%	11%	5%	11%

Fuente: Elaboración Propia en base a Anexo G (DGA, 2019a).

De este resumen, se escogen entonces las menores variaciones de precipitación y escorrentía para cada cuenca estudiada, dejando como resultado los MCGs CSIRO y CCSM4. Lo anterior se debe a que, en caso de escoger modelos que posean una variación mayor para la precipitación y escorrentía, podrían generar en el modelo acoplado el fenómeno de "celdas secas" que tiene como resultado la no convergencia del modelo, debido a la falta de agua circulante a través de los sistemas superficiales y subterráneos acoplados.

Adicionalmente, en Tabla 3.2-4 se aprecian los valores promedio de precipitación y temperatura para el periodo histórico (1985-2015) en contraste con los montos promedios para cada MCG seleccionado y su respectiva proyección futura (2020-2050).

**Tabla 3.2-4 Valores de precipitación y temperatura promedio para el periodo histórico y futuro.**

Modelo MCG	Línea Base		CCSM4		CSIRO	
	1985-2015		2020-2050		2020-2050	
Variable	PP [mm/año]	T [°C]	PP [mm/año]	T [°C]	PP [mm/año]	T [°C]
Punta Arenas	513,94	4,85	526,20	5,50	510,10	5,04
Tierra del Fuego	712,84	3,88	725,31	4,55	702,44	4,07

Fuente: Elaboración Propia en base a Anexo G (DGA, 2019a).

A partir de los resultados anteriores, se propone realizar los dos escenarios de cambio climático en los modelos, considerando las forzantes de dichos MCG, y una situación de demanda 2019 replicada hasta 2050, de manera de evaluar las variaciones de la oferta hídrica en los modelos, y verificar el correcto funcionamiento de los modelos acoplados en la situación futura (identificar potenciales secados de celdas, variaciones bruscas de nivel, problemas de convergencia, propios de la eventual variación de la oferta hídrica en las cuencas).

A partir de esta revisión se escogió el modelo MCG sobre el cual se evalúan dichos escenarios, tal como muestra la Tabla 3.2-5.

**Tabla 3.2-5 Escenarios de cambio climático modelados**

<b>Escenarios CC</b>	<b>Periodo</b>	<b>OBS</b>
<b>E1 CC</b>	<b>Abr 1991 - Mar 2050</b>	
Forzantes	Abr 1991 - Mar 2050	BH MCG CSIRO
Demandas	Abr 2019 - Mar 2050	Replicadas desde 2019 para analizar variación de oferta hídrica y cómo responde el sistema para garantizar funcionamiento
<b>E2 CC</b>	<b>Abr 1991 - Mar 2050</b>	
Forzantes	Abr 1991 - Mar 2050	BH MCG CCSM4
Demandas	Abr 2019 - Mar 2050	Replicadas desde 2019 para analizar variación de oferta hídrica y cómo responde el sistema para garantizar funcionamiento

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: La elección de los dos modelos depende de aquellos que presenten las menores disminución de precipitación y escorrentía.

### **3.2.3 Dimensión ambiental**

#### **3.2.3.1 Unidades ecosistémicas**

A continuación, se presenta la metodología aplicada en la caracterización de las principales unidades ecosistémicas identificadas en las cuencas Vertientes del Atlántico.

##### **i. Ecosistemas terrestres**

Con el objetivo de reconocer y definir las principales unidades ecosistémicas presentes en las cuencas Vertientes del Atlántico se consideró la cobertura cartográfica digital de los pisos de vegetación de Chile, provenientes de la Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile de Pliscoff del año 2017 y que el Ministerio del Medio Ambiente ha dispuesto en el centro de descarga IDE Chile (<https://www.ide.cl/>).

##### **ii. Ecosistemas de aguas continentales**

La identificación de los cuerpos de agua presentes en las cuencas Vertientes del Atlántico se realizó a partir de la información contenida en el Inventario Nacional de Humedales que ha dispuesto el Ministerio del Medio Ambientes en su portal web (<https://humedaleschile.mma.gob.cl/inventario-humadales/>). A partir de esta información, se reconoció la ubicación, tipos de humedales y superficies. La información presentada consideró la identificación y representación cartográfica de los principales humedales presentes en la cuenca.

##### **1. Turberas**

A partir del libro llamado "Funciones y Servicios Ecosistémicos de las turberas de Magallanes" realizado por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA, 2015) se describen, caracterizan y se explica la importancia de ellas para el sistema hídrico de la cuenca.

## **2. Cuerpos de agua emergentes permanentes**

A partir del Inventario de Humedales del Ministerio del Medio Ambiente, se identifica la categoría de humedales “palustres emergentes permanentes”, los que se definen y explican a partir del antecedente “Balance hídrico de humedales de uso agropecuario” del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA, 2021).

## **3. Ríos**

A partir del Inventario de Humedales del Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 2020) se identifican los humedales clasificados como cuerpos de agua “continentales, ribereños, ríos”, haciendo referencia al acápite 2.3.1.2 de los ecosistemas de aguas continentales. Adicionalmente se hace mención a las actividades PAC respecto a lo comentado por actores de los ríos de las cuencas Vertientes del Atlántico.

## **4. Flora y fauna de los humedales**

La identificación de especies de flora y fauna vinculadas a los humedales de las cuencas Vertientes del Atlántico se realizó a partir del Inventario Nacional de Especies, cuya plataforma web (<http://especies.mma.gob.cl/>) permite filtrar especies por taxonomía, como también por regiones y comunas. Este buscador posee una falla al filtrar por comunas, por lo tanto, se verificó el listado para cada especie (sólo para las con categoría de amenaza), con el fin de tener seguridad de que su distribución perteneciera a la cuenca. A partir de lo anterior, se identificaron aquellas especies con alguna categoría de amenaza según la IUCN<sup>1</sup>, y se describieron aquellas atingentes a ambientes acuáticos. Adicionalmente, se complementa la información con bibliografía complementaria.

## **5. Afecciones a ecosistemas acuáticos**

A partir de las actividades de participación ciudadana (PAC) se identificaron especies exóticas invasoras que amenazan el sistema hídrico de la cuenca. Se describen brevemente y se explican las afecciones y amenazas para cada una de ellas en la cuenca, según la bibliografía consultada.

## **6. Servicios ecosistémicos de los cuerpos de agua**

### **• Definición**

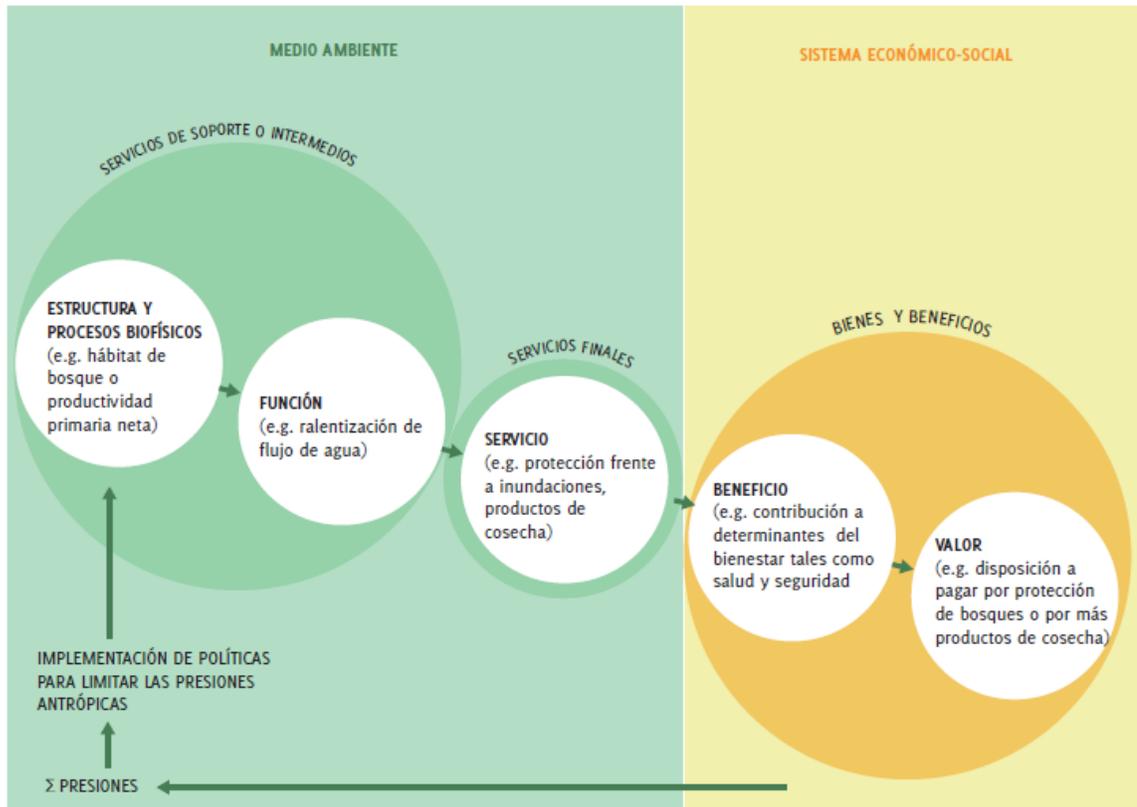
El concepto de Servicio Ecosistémico ha surgido debido a la preocupación del ser humano por entender el valor de la naturaleza que lo rodea, y de entender cómo el deterioro del entorno natural también afecta a los seres humanos en su vida cotidiana. De esta preocupación, algunos autores han elaborado definiciones con distintas perspectivas del término, a lo largo de los últimos 40 años aproximadamente (MMA, 2019), pero en los últimos 10 años se han incrementado de manera exponencial las publicaciones científicas al respecto (Fisher et al., 2009). Sin ahondar en los detalles de la evolución del concepto, se utilizará para objeto de este estudio la definición adoptada por el Ministerio de Medio Ambiente (MMA). Se concibe, entonces, como “servicio ecosistémico” a la “contribución directa o indirecta de los ecosistemas al bienestar humano”. Aquellos de contribución directa

---

<sup>1</sup> Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.

son llamados servicios finales, mientras que los que contribuyen indirectamente se les denomina servicios intermedios. El uso de los SS. EE. proveen beneficios tales como nutrición, salud y placer (MMA, 2018).

A modo de entender de mejor manera la estructura y dinámica de los procesos ecosistémicos que ocurren en la naturaleza, el Ministerio del Medio Ambiente adopta como marco conceptual un concepto creado por Potschin & Haines-Young (2011) que se resume como "Cascada de Servicios Ecosistémicos" y se explica por medio de un diagrama (Figura 3.2-1).



Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, (2018).

**Figura 3.2-3 Cascada de los Servicios Ecosistémicos basada en Potschin & Haines-Young (2011)**

La CSA (Cascada de Servicios Ecosistémicos) explica cómo la protección y conservación de los ecosistemas aseguran un flujo continuo de valores y beneficios en el sistema social y económico, revelando el carácter antropocéntrico de la definición, ya que supone que los servicios ecosistémicos toman sentido siempre y cuando exista un beneficiario (MMA, 2018).

- **Clasificación**

Siguiendo la misma línea del MMA, se utilizará como clasificación de los servicios ecosistémicos la "Clasificación común internacional de Servicios Ecosistémicos" (Potschin & Haines-Young, 2011), el cual se considera el estado del arte en la

materia, ya que corresponde a un esfuerzo internacional para acordar una clasificación común de SS.EE, permitiendo así que Chile también aporte en su clasificación (MMA, 2018). La Tabla 3.2-6 sintetiza los tres grupos de servicios ecosistémicos finales (o directos), sus divisiones y grupos involucrados.

**Tabla 3.2-6 Clasificación de los Servicios Ecosistémicos según Potschin & Haines-Young (2011)**

Sección	División	Grupo	Clase
Aprovisionamiento	Nutrición	Biomasa	Tierras para cultivos
			Crianza de animales y sus productos
			Plantas y algas silvestres y sus productos
			Animales silvestres y sus productos
			Plantas y algas de la acuicultura in situ
			Animales de la acuicultura in situ
	Agua	Agua superficial para beber	
		Agua subterránea para beber	
	Materiales	Biomasa, fibra	Fibras y materiales de las plantas y algas para uso directo o procesamiento
			Materiales de las plantas, algas y animales para el uso agrícola
			Material genético de toda la biota
		Agua	Aguas superficiales para fines no potables
	Aguas subterráneas para fines no potables		
	Energía	Fuentes de energía a base de biomasa	Recursos basados en plantas
Recursos basados en animales			
	Energía mecánica	Energía basada en animales	
Regulación y Mantenimiento	Mediación de desechos tóxicos y otros	Mediación por biota	Biorremediación por microorganismos, algas, plantas y animales
			Filtración/secuestro/almacenamiento/acumulación por microorganismos, plantas, algas y animales
		Mediación por los ecosistemas	Filtración/secuestro/almacenamiento/acumulación por ecosistemas
			Dilución por atmósfera, agua dulce y ecosistemas marinos
	Mediación de caudales	Flujos de masa	Estabilización masiva y control de las tasas de erosión
			Amortiguación y atenuación de flujos de masa
		Flujos de líquido	Mantenimiento del ciclo hidrológico y del caudal de agua
			Protección ante inundaciones
		Flujos gaseosos	Protección ante tormentas
			Ventilación y transpiración
Mantenimiento de las	Mantenimiento del ciclo de vida,	Polinización y dispersión de semillas	

<b>Sección</b>	<b>División</b>	<b>Grupo</b>	<b>Clase</b>
	condiciones físicas, químicas y biológicas	protección del hábitat y del acervo genético	Mantener las poblaciones y los hábitats de los viveros
		Control de plagas y enfermedades	Control de plagas
			Control de enfermedades
		Formación y composición del suelo	Procesos de meteorización
			Procesos de descomposición y fijación
		Condiciones del agua	Condición química de las aguas dulces
			Estado químico de las aguas saladas
		Composición atmosférica y regulación climática	Regulación del clima global mediante la reducción de las concentraciones de gases de efecto invernadero
			Regulación climática micro y regional
		<b>Cultural</b>	Interacciones físicas e intelectuales con la biota, los ecosistemas y los paisajes terrestres / marinos [entornos ambientales]
Uso físico de paisajes terrestres / marinos en diferentes entornos ambientales			
Interacciones intelectuales y representativas	Científico		
	Educacional		
	Cultural y herencia		
Interacciones espirituales, simbólicas y de otro tipo con la biota, los ecosistemas y los paisajes terrestres / marinos [entornos ambientales]	Espiritual y/o emblemático		Entretenimiento
			Estético
	Otras interacciones culturales		Simbólico
			Religioso y/o sacro
			Existencial
	Legado		

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, (2018).

- **Valoración**

Para dar valor a los bienes y servicios que los ecosistemas nos proveen, es necesario relacionar esos bienes con la variación que su ausencia provocan en la sociedad o en las personas individualmente. En este sentido, el valor económico es aquella medición de la variación del bienestar, que puede ser individual o colectivo, en el contexto de escasez en que se desarrollan las actividades humanas. Es decir que, en contextos de escasez, se puede identificar cuánto valoran las personas que viven en determinado lugar un bien o servicio que depende de otro para sumar bienestar de las personas. Esto se puede ejemplificar con la variación de los productos agrícolas cuando hay períodos de sequía u otros factores ambientales que alteran la producción (Figuroa B. et al., 2010).

Existen variados métodos para valorar económicamente los SSEE, siendo el más utilizado el Valor Económico Total (VET) que es la sumatoria de los valores económicos de cada bien o servicio proporcionado por un ecosistema en particular. Este cálculo puede verse afectado por la dificultad en la búsqueda de metodologías e información que permitan saber el valor más acertado de un determinado bien o servicio. Por lo tanto, se debe tener en cuenta esta complicación y las limitaciones que implica. Por ejemplo, la subvaloración de ciertos servicios por la falta de información o por la incapacidad de valorarlos ya que no están sujetos a mercados (Figuroa B. et al., 2010).

Existen variadas técnicas de valoración de servicios ecosistémicos en la literatura internacional y nacional, y su uso depende del servicio que se pretende valorar, si tiene o no mercado, etc. Estos son: precios de mercado, costo de viaje, precios hedónicos, mercados sustitutos, función de producción, valoración contingente, elección contingente, costo de reemplazo, gastos preventivos, costo de oportunidad, y transferencia de beneficios (Figuroa B. et al., 2010).

### **iii. Áreas bajo protección oficial y otras figuras de conservación**

El reconocimiento de áreas bajo protección oficial y con otras categorías de conservación se realizó a partir del Registro Nacional de Áreas Protegidas (RNAP) que ha dispuesto el Ministerio del Medio Ambiente en su portal web (<http://areasprotegidas.mma.gob.cl/>).

A partir de la información contenida en la fuente antes mencionada, se tiene que cada área protegida cuenta con un código que la identifica en el Registro Nacional de Áreas Protegidas (RNAP) del Ministerio del Medio Ambiente. Cada código se corresponde con una ficha que ha sido anexa al presente estudio (Anexo J.4). En este registro se puede revisar toda la información referente a las áreas protegidas, como su localización, tipo de ambiente, tipo de ecorregión presente, cuencas, categoría o designación, superficie, historia legal, divisiones administrativas, biodiversidad, gestión, categoría de manejo UICN y límites.

La información presentada consideró la identificación y representación cartográfica de las áreas de conservación presentes en la cuenca.

### **3.2.3.2 Glaciares**

En este apartado se identifican los glaciares presentes en la cuenca, utilizando como referencia el Inventario Público de Glaciares (DGA, 2014). También se describen y clasifican los servicios ecosistémicos asociados, según la metodología propuesta en el acápite 3.2.3.1ii.6.

### **3.2.4 Infraestructura**

La metodología seguida en el diagnóstico de la infraestructura hídrica dependerá en gran medida del nivel de detalle de la información disponible en cada ámbito, en relación con las obras que potencialmente podrían mejorarse y/o construirse en aras de optimizar la gestión del recurso hídrico.

La identificación y análisis de funcionamiento y estado relativo a la infraestructura se ha organizado en Obras Hidráulicas y Red Hidrométrica.

#### **3.2.4.1 Obras hidráulicas**

La identificación de las obras de infraestructura relativas al recurso hídrico que son relevantes para el propósito del estudio, se realizó a partir de la información pública que disponen los distintos organismos del Estado vinculados a la materia, entre los que se destaca la Dirección General de Aguas, la Comisión Nacional de Riego y la Superintendencia de Servicios Sanitarios.

A partir de la acción antes señalada, se reconoció la existencia de las obras de infraestructura presentes en la cuenca sobre las cuales se realizó la caracterización y diagnóstico.

El diagnóstico de las obras hidráulicas consideró la búsqueda de iniciativas de inversión, tanto públicas como privadas, vinculadas a la temática, así como también los comentarios aportados durante las reuniones PAC del estudio con actores relevantes.

#### **3.2.4.2 Red hidrométrica**

El catastro y análisis de la red hidrométrica se dividió en tres secciones, las cuales se detallan a continuación. Adicionalmente, se incluyó una sección final donde se sintetizaron las brechas o barreras identificadas que impactan en la caracterización, organización de la información, interacción entre actores de la cuenca, accesibilidad y carencia de información de monitoreo hidrométrico.

##### **i. Red hidrométrica de la DGA**

Se accedió al sitio web de la DGA, desde donde se descargaron los *shapefile* que indican la ubicación de todas las estaciones administradas por la DGA. En base a esto, se identificaron las estaciones disponibles en la zona de estudio. A continuación, se descargó la estadística y se analizaron los registros disponibles, con especial énfasis en el periodo de monitoreo, número de registros disponibles, la vigencia de las estaciones, la elevación, las coordenadas de ubicación y el datum.

## **ii. Red hidrométrica pública de otras instituciones**

En base a la experiencia del consultor, se consultaron las bases de datos de monitoreo de diferentes organismos públicos, con el fin de determinar la presencia de estaciones y realizar el mismo análisis realizado para la red hidrométrica de la DGA.

## **iii. Red hidrométrica privada**

Se ingresó al Servicio de Evaluación Ambiental, donde se identificaron estudio y declaraciones de impacto ambiental en la zona de estudio. A continuación, se revisaron los documentos ingresados en cada proyecto, con el fin de recopilar y sintetizar la información disponible de monitoreo, considerando los mismos criterios de análisis que en el caso de la red hidrométrica de la DGA.

### **3.2.5 Nuevas fuentes de agua**

La identificación de nuevas fuentes de agua existentes en las cuencas Vertientes del Atlántico se realizó en base a la información primaria recabada en instancias PAC, y secundaria con contenido asociado a la temática.

### **3.2.6 Gobernanza**

A continuación, se presenta la metodología aplicada para el análisis de gobernanza hídrica para las cuencas Vertientes del Atlántico.

#### **3.2.6.1 Mapa de agentes**

La metodología de desarrollo del mapa de actores se presenta en Anexo I.9 *Metodología PAC*, acápite 3.1.3.2.

#### **3.2.6.2 Brechas de coordinación**

Para la definición de brechas de coordinación se realizó una revisión de antecedentes desde fuentes primarias y secundarias; el análisis de dicho material se dividió en 3 temáticas:

- Análisis de Organizaciones de Usuarios de Agua: En este punto se revisó la existencia o ausencia de OUs en la cuenca, su nivel de funcionalidad y condiciones de conformación.
- Estado actual de coordinación: Considerando la diversidad de actores identificados en el mapa de agentes, esta sección se subdividió en: i) Estado de relación entre usuarios de agua e instituciones públicas; ii) Estado de relación entre usuarios de agua titulares de DAA y usuarios de agua sin DAA; iii) Estado de relación de la DGA con usuarios de agua; iv) Instancias de relación entre actores; y v) Contexto social y conflictos ambientales.
- Síntesis de brechas de coordinación: En este punto se presenta un resumen de las principales brechas identificadas en el desarrollo de los puntos anteriores.

### **3.2.6.3 Brechas de información**

Al igual que en el apartado anterior, para la definición de brechas de información se realizó una revisión de antecedentes desde fuentes primarias y secundarias; el análisis de dicho material se dividió en 3 temáticas:

- Estado actual de información hídrica: Para este punto se identificaron 2 temas relevantes a analizar: i) Estado actual de información sobre Derechos de Aprovechamientos de Agua (DAA); y ii) Disponibilidad de información hídrica.
- Herramientas de información hídrica: Este apartado se centró en identificar las diferentes herramientas disponibles para el levantamiento de información de relevancia para la gestión del recurso hídrico; asimismo, también se señalaron algunos de los problemas relacionados al uso e implementación de dichas herramientas.
- Síntesis de brechas de información: En este punto se presenta un resumen de las principales brechas identificadas en el desarrollo de los puntos anteriores.

### **3.2.7 Cartera de acciones**

A continuación, se presenta la metodología aplicada para la identificación de iniciativas, acciones o medidas en materia hídrica para las cuencas Vertientes del Atlántico.

#### **3.2.7.1 Identificación de acciones e iniciativas en materia hídrica**

La cartera de acciones ha considerado iniciativas públicas identificadas en el portal web del Banco Integrado de Proyectos (BIP) y medidas, planes y compromisos voluntarios de proyectos mineros vinculados a la cuenca. El detalle se presenta a continuación.

##### **i. Iniciativas en el Banco Integrado de Proyectos (BIP)**

Para el diagnóstico de las acciones e iniciativas de inversión en la cuenca del río Copiapó se consideró la información contenida en el Banco Integrado de Proyectos (BIP) del Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MIDESO), disponible en línea en la página web del servicio [www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl](http://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl).

La información contenida en la base de datos considera la información de diversas instituciones formuladoras tales como: Comisión Nacional de Riego (CNR), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Servicio Nacional de Geología y Minería, entre otras.

La metodología empleada se basó en la identificación de iniciativas de Estudios, Proyectos y Programas vinculados a los recursos hídricos a nivel de cuenca y a nivel regional e interregional con incidencia en la cuenca de estudio, a fin de considerar iniciativas que, si bien no son exclusivas de la cuenca en estudio, tiene alguna incidencia sobre esta. Para esto se hizo una selección de iniciativas conforme a los siguientes criterios:

- Identificación de iniciativas a nivel de cuenca
- Iniciativas en periodo 2021-2030.

- Iniciativas vinculadas al recurso hídrico.
- Iniciativas vinculadas exclusivamente a la cuenca en estudio.
  
- Identificación de iniciativas a nivel regional e interregional
- Iniciativas en periodo 2021-2030.
- Iniciativas vinculadas al recurso hídrico.
- Iniciativas con incidencia en la cuenca en estudio.

Cabe mencionar que en ambos casos se debió revisar las fichas IDI, que resumen los antecedentes de la iniciativa de inversión postulada, a fin de identificar y corroborar la localización geográfica de estas.

El detalle de la información se presenta en el Anexo J.11, correspondiente a las bases de datos obtenida y su sistematización. Se entrega en dicho anexo cada una de las fichas IDI de las iniciativas consideradas en el diagnóstico.

### **3.3 METODOLOGÍA APLICADA EN LA DEMANDA FÍSICA Y LEGAL DE RECURSOS HÍDRICOS PARA DIFERENTES USOS**

En el presente acápite, en primer lugar, se presenta la metodología para estimar las demandas de agua para los diferentes sectores productivos, así como otros usos del agua; y seguidamente, se aborda el análisis de los Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) otorgados en la cuenca y su mercado de aguas.

Por su parte, los resultados de la estimación de la demanda de agua actual y proyección de demanda futura, para los diferentes usos y/o consumos productivos y otros, se presenta en el Capítulo 3 del Informe Final. Además, se incluyen los resultados del análisis de DAA por demanda y/o uso, y se complementa con el análisis del mercado de aguas realizado en la cuenca.

#### **3.3.1 Estimación de demanda hídrica actual y proyección futura**

Este punto se desarrolló teniendo como referencia principal (pero no excluyente) el documento "Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile" (DGA-HID-AQT, 2017), el cual realiza un diagnóstico desagregado de las demandas de agua actual (año 2015) y proyecciones futuras (años 2030 y 2040), a nivel de subcuencas. En aquel estudio se encuentra el detalle tanto de los antecedentes como la metodología para el cálculo de la demanda actual y futura para los distintos rubros y/o actividades económicas. La metodología desarrollada en este documento es adaptable a cualquier unidad territorial, en este caso se adoptó a nivel cuenca, calculando la demanda de agua actual (año 2020) y proyecciones futuras (años 2030 y 2050).

Seguidamente se presenta la metodología aplicada en cada tipología de demanda y/o uso de agua, tanto actual (año 2020) como proyecciones futuras (año 2030 y 2050).

##### **3.3.1.1 Agua potable urbana y/o rural**

Dadas las características de la cuenca identificadas a partir del análisis de información de estudios y proceso PAC, no existe demanda de agua potable urbana ni rural.

##### **3.3.1.2 Agrícola y pecuaria**

A continuación, se presenta la metodología empleada para la estimación de la demanda agrícola y pecuaria.

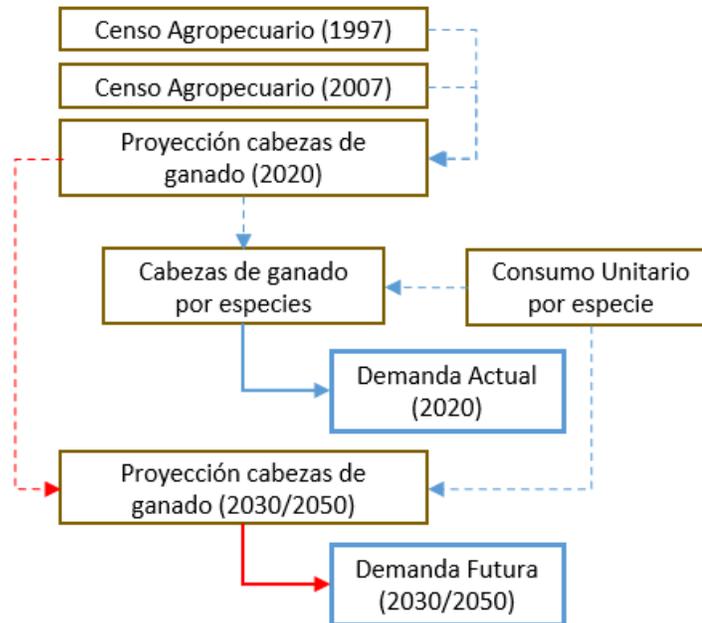
###### **i. Demanda agrícola**

La demanda de agua agrícola tiene relación con actividades de riego. Dadas las características de la cuenca identificadas a partir del análisis de información de estudios y proceso PAC, no existe demanda agrícola a gran escala.

## ii. Demanda pecuaria

La demanda de agua del sector pecuario está referida específicamente al consumo de agua para ganado bovino, porcino, ovino, caprino, producción avícola y otras de menor entidad (equinos, camélidos y especies minoritarias).

Para crear una imagen general de la metodología y las fuentes de información para llevarla a cabo, la siguiente Figura 3.3-1 esquematiza los procesos que serán descrito más adelante.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.3-1 Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de Uso Pecuario**

Para actualizar las cifras de ganado a la fecha de referencia actual (año 2020), se determina la tendencia complementándose con dos fuentes de información adicionales, las encuestas de ODEPA (bovino y ovino) obtenida de las estadísticas productivas de su sitio web, e información SAG (bovino). Cabe señalar que la ausencia de un censo agropecuario más actualizado aumenta la incertidumbre sobre las cifras estimadas, que sólo han podido ser inferidas a partir de las fuentes anteriormente indicadas.

La determinación de la demanda de agua pecuaria se consideró un consumo unitario por animal o cabeza de ganado. Para lo anterior, se calculó la demanda de agua diaria aplicando unas tasas de consumo diario por animal, según el estudio "Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile" (DGA, 2017) (Tabla 3.3-1).

**Tabla 3.3-1 Tabla de equivalencia de requerimientos de agua para producción pecuaria**

Producción	Tipología animal	Consumo	Consumo
		(l/animal/día)	(m3/animal/año)
Bovina	Ternero/a	22,5	8,21
	Vaquilla	27	9,86
	Novillo	35	12,78
	Vaca (carne), toro, buey	45	16,43
	Vaca lechera	55	20,08
Ovina	Oveja, carnero, capón, borrego/a	4,5	1,64
	Cordero/a	2	0,73
Caprina	Cabra	3,5	1,28
	Cabrito/a	1,5	0,55
Avícola	Pollo	0,31	0,11
	Pavo	0,76	0,28
	Pato, ganso	0,5	0,18
	Avestruz	10	3,65
	Emú	5	1,83
	Codorniz, faisán	0,05	0,02
Otras especies	Porcina	30	10,95
	Caballo, mula, asno	45	16,43
	Alpaca, llama, huarizo	3	1,10
	Jabalí	40	14,60
	Ciervo	5	1,83
	Conejo, chinchilla	0,35	0,13
	Cuy	0,85	0,31

Fuente: Elaboración propia.

La metodología para determinar la proyección consistió en calcular la tendencia de las cabezas de ganado futura, utilizando la herramienta de análisis "TENDENCIA" de Excel. Para ello, se toman los valores de cantidad de animales por grupo de ganadería en los años 1997, 2007 y los años disponibles en las encuestas ODEPA a escala de distrito censal y se proyectaron anualmente hasta el año 2050. A partir de lo anterior, y utilizando la tasa de consumo diario de agua por especie se estimó la demanda para los años 2020, 2030 y 2050.

### 3.3.1.3 Minería

La cuenca no presenta actualmente actividad minera asociada al recurso minero metálico a gran escala. Respecto al recurso minero carbón, actualmente, y de acuerdo a la información proporcionada por SERNAGEOMIN, en la cuenca no existen faenas mineras en estado activo.

La metodología para la estimación de la demanda hídrica relacionada a la extracción de recursos energéticos (petróleo y gas natural) ha sido estimada como parte de la demanda energética y se presenta en el acápite 3.3.1.6.

#### **3.3.1.4 Industrial**

Dadas las características de la cuenca identificadas a partir del análisis de información de estudios y proceso PAC, no existe demanda industrial.

#### **3.3.1.5 Energética**

En la demanda energética se engloba tanto la demanda hídrica asociada a la explotación de hidrocarburos (entendido como combustible), como aquellos consumos ligados a la generación eléctrica.

##### **i. Hidrocarburos**

La demanda hídrica asociada a la exploración y producción de hidrocarburos (petróleo y gas natural) ha sido estimada a partir de la información que disponen las principales empresas en la cuenca a través de sus portales web. Esta información ha sido complementada con la recabada en instancias de Participación ciudadana de este estudio.

##### **ii. Generación eléctrica**

Dadas las características de la cuenca identificadas a partir del análisis de información de estudios y proceso PAC, no existe demanda eléctrica.

#### **3.3.1.6 Demanda ambiental y caudal de protección ambiental**

En este punto se presenta la metodología aplicada para estimar la demanda evapotranspirativa de la cobertura vegetal presente en las cuencas Vertientes del Atlántico, como aquella aplicada para determinar un caudal de protección ambiental.

##### **i. Demanda evapotranspirativa**

Para poder determinar la evapotranspiración de las coberturas vegetales presentes en la zona de estudio, se utilizó la siguiente expresión:

$$EVT = ET_0 \cdot k_c \cdot A \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

EVT: Evapotranspiración.

$k_c$ : Coeficiente de cultivo.

$ET_0$ : Evapotranspiración de referencia, donde se utiliza el producto grillado del Balance Hídrico (DGA, 2018).

A: Área.

Para los coeficientes de cultivo, se utilizaron preliminarmente los valores que se presentan en la Tabla 3.3-2. Luego, a partir del modelo elaborado en WEAP se obtienen los valores de EVT real de acuerdo con el balance hídrico calculado sobre cada superficie y uso.

**Tabla 3.3-2 Coeficientes de cultivo según cobertura de suelo**

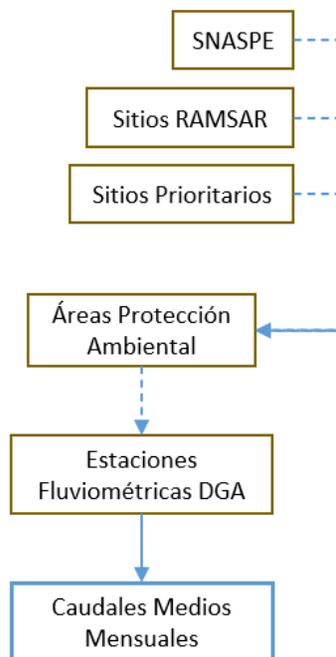
Tipo de suelo	Kc
Bosque	0,9
Pastizal	0,5
Matorral	0,3

Fuente: Elaboración propia.

## ii. Caudal de protección ambiental

Por otro lado, el concepto de protección ambiental está referido a todas aquellas acciones personales o comunitarias que tiendan a defender, mejorar o potenciar la calidad de los recursos naturales de determinado ecosistema.

Para exponer la metodología y las fuentes de información para llevarla a cabo, la Figura 3.3-2 esquematiza los procesos que serán descrito más adelante.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.3-2 Esquema general de la metodología para estimación de demanda actual y futura de protección ambiental**

En informes desarrollados en conjunto con la DGA, se procedió a fijar el monto de caudal a reservar para protección ambiental, en donde se utilizaron los siguientes principios:

- Se busca encontrar un caudal de conservación (protección) ambiental, definido por la suma del caudal ecológico más el de reserva por interés nacional, que es el tramo comprendido entre el caudal ecológico y el 20% de probabilidad de excedencia. Esto permitirá mantener la mayor parte del tiempo, en su condición natural, la distribución de caudales en la cuenca y de esta manera mantener prácticamente inalterada la magnitud, frecuencia, y duración del régimen hídrico. Obteniéndose de esta manera la relación que se ocupara en los cálculos:
- Caudal de reserva para la protección ambiental:

$$Q_{\text{reserva ambiental}} = Q_{\text{prob.de excedencia 20\%}} - Q_{\text{ecológico}} \quad \text{Ec. 2}$$

Este cálculo se aplicó al área protegida existente en la cuenca identificando una estación fluviométrica de referencia de la red hidrométrica de la DGA.

### iii. Caudal ecológico

Se analizó la información de caudales históricos de las estaciones fluviométricas dentro de las cuencas estudiadas. El análisis consideró las estaciones con mayor cantidad y continuidad de registros.

Adicionalmente se estimó, a partir de la información contenida en el CPA, el caudal ecológico de los principales cursos de aguas superficiales en la cuenca. Para esto, se consideró el mayor valor de caudal ecológico presente en un mismo curso de agua superficial. Los valores de caudal ecológico fueron recabados a partir de los registros de DAA disponibles en el portal web del servicio, [www.dga.cl](http://www.dga.cl) y los expedientes asociados a cada DAA que dispone la DGA.

#### 3.3.1.7 Uso turístico

Dadas las características de la cuenca, identificadas a partir del análisis de información, no existen Zonas de Interés Turístico (ZOIT).

#### 3.3.1.8 Acuícola

Dadas las características de la cuenca, identificadas a partir del análisis de información, no existe demanda acuícola.

### 3.3.2 Análisis de DAA y mercado de DAA

A continuación, se describe el proceso metodológico para el análisis diagnóstico de los Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) otorgados por la DGA, y para el análisis del mercado de los DAA en las cuencas Vertientes del Atlántico. El diagnóstico se estructura, por tanto, en dos partes, con el siguiente detalle:

- Recopilación, análisis y sistematización de la información asociada a los DAA.
- Análisis del mercado de los DAA.

Los resultados y análisis, a nivel de las cuencas Vertientes del Atlántico, se presentan en los puntos siguientes:

- Acápite 4.1.6 del Informe Final: DAA superficiales concedidos
- Acápite 4.2.5 del Informe Final: DAA subterráneos concedidos
- Acápite 3.1.3 del Informe Final: Derechos de agua para uso humano.
- Acápite 3.2.2 del Informe Final: Derechos de agua para el medio ambiente.
- Acápite 3.3.4 del Informe Final: Derechos de agua para la agricultura.
- Acápite 3.4.2 del Informe Final: Derechos de agua para la minería.
- Acápite 3.5.2 del Informe Final: Derechos de agua para la industria.
- Acápite 3.8 del Informe Final: Mercado de aguas

### **3.3.2.1 Recopilación, análisis y sistematización de la información asociada a los DAA**

Para el análisis de los DAA constituidos en las cuencas Vertientes del Atlántico, se utilizó la base de datos "Derechos de aprovechamiento de aguas en cuencas Vertientes del Atlántico" obtenida mediante solicitud formal a la Inspección Fiscal de la DGA. Esta base de datos fue contrastada con la información contenida en el Catastro Público de Aguas (CPA), (mantenedor de Expedientes y Derechos Concedidos, DGA), disponible en línea en la página web del servicio, [www.dga.cl](http://www.dga.cl). Del cruce de datos entre las fuentes antes mencionadas, se verificó la información existente y actualizo aquellos registros que carecían de información.

Los pasos realizados para el análisis y sistematización de la información se detallan a continuación:

- 1.- Se revisó la información de DAA contenida en la base de datos proporcionada por la DGA, la cual debió ser contrastada y complementada con la información disponible en el CPA. En base a esto, se cuantificó el total de "DAA otorgados" y "Caudal" (l/s).
- 2.- Se cuantificó el total de DAA y Caudal en función de las siguientes variables:
  - Naturaleza del DAA, esto es, superficial o subterráneo.
  - Tipo de solicitud, esto es:
    - ✓ Derechos de Aprovechamiento (ND) (artículos 130 y siguientes del Código de Aguas).
    - ✓ Regularización de Derechos (NR) (artículo 2º transitorio del Código de Aguas)
    - ✓ Derechos de Usuarios Antiguos (UA).
  - Tipo del derecho y Ejercicio del derecho solicitado.
- 3.- Por último, en base al cruce de información descrito, se generó una cobertura SIG en formato *shapefile* para la cuenca en estudio con información relativa a cada DAA.

Los atributos que componen los *shapefile* de DAA son todos aquellos registros disponibles en las bases de datos antes mencionadas. Esto con el objetivo de no eliminar información que pudiese ser requerida en futuros análisis.

A partir de las coberturas descritas anteriormente, se generó una figura con la distribución en cada cuenca de los DAA superficiales y subterráneos.

### **3.3.2.2 Análisis del mercado de los DAA**

Para el diagnóstico del Mercado de los DAA en las cuencas Vertientes del Atlántico se consideró la información contenida en la base de datos que dispone la DGA y que registra las transacciones informadas por los Conservadores de Bienes Raíces (CBR). Disponible en línea en la página web del servicio <https://snia.mop.gob.cl/ciudadaniacbr/>.

La metodología empleada se basó en el análisis de la información de transacciones efectivas de DAA en el mercado y cuyo resultado corresponde al estimado de transacciones y su evolución en el tiempo. De esta manera, se trabajó con las transacciones informadas por el CBR con jurisdicción en las comunas que integran las cuencas Vertientes del Atlántico. El periodo relevante considerado en este estudio comprendió toda la data de transferencias informadas por el respectivo CBR. Los CBRs considerados para el análisis fueron el CBR de Punta Arenas y el CBR de Puerto Natales.

Los pasos realizados para el análisis y sistematización de la información del Mercado de los DAA se detallan a continuación:

1. Integración de registros DGA y contenidos en el Registro Público de Aguas del CBR: Con el objetivo de establecer una línea de análisis, pertinente al requerimiento de caracterizar el mercado de los DAA inscritos en las cuencas Vertientes del Atlántico, se requirió complementar la información contenida en los Registros de Propiedad de Aguas (RPA) a cargo de los CBRs de Punta Arenas y Puerto Natales (únicos con jurisdicción en la cuenca) con el Registro Público de Derechos de Aprovechamiento de Aguas del CPA y la información facilitada en el marco del presente estudio por la Inspección Fiscal (I.F.) de la DGA.

De esta manera, para el análisis del mercado de los DAA, se consideró como esencial del CPA y de las bases de datos facilitadas por la I.F. todo lo concerniente a la ubicación de los DAA. En relación con el CBR, se consideró importante lo relativo a la caracterización del tipo de transacción. Para ambas fuentes se estimó como punto de encuentro para el cruce de información los registros que singularizan una inscripción en el RPA, esto es: N° de Foja, Foja y Año de Inscripción en el CBR. En los casos en donde esta información no se encontraba se utilizó la "Fuente" (rio, estero, etc.) y/o el nombre del solicitante/comprador registrado en las bases de datos.

2. Depuración de la base de datos: Conforme a la acción antes señalada, las bases de datos del CBR fueron depurada, descartando todos aquellos DAA que no se ubican dentro de la cuenca. De esta manera se obtuvo el total de derechos transados vía mecanismo de mercado, el tipo de transferencia, el

periodo en que fue transferido y los sectores involucrados en la transferencia (intrasectorial e intersectorial).

3. Presentación de resultados: A partir de la información histórica de transferencia de DAA, se cuantificó el número total de transferencias efectuadas y su distribución anual histórica. Complementario a lo anterior, se identificaron los sectores con mayor actividad en el mercado, reconociendo las transferencias más frecuentes (intrasectoriales e intersectoriales) de DAA.

### **Estimación del valor litros por segundo (l/s) según naturaleza del agua**

Para la estimación del valor litros por segundo (l/s), se utilizó como referencia la metodología que la SISS utiliza para la estimación del valor de los derechos de aprovechamiento de aguas en los procesos tarifarios que se llevan a cabo cada 5 años y que se encuentra plasmada en el estudio "Análisis de Mercados de Derechos de Aprovechamiento de Aguas en Chile", SIT N.º 438, diciembre 2018.

La metodología usada por SISS establece que la estimación del valor único de litros por segundo (l/s) de una fuente de abastecimiento o mercado se realiza sobre la base de información efectiva de transacciones de DAA.

La información sobre las transacciones de DAA fue sometida a un proceso de depuración, el que corresponde al indicado previamente, para aislar los datos inconsistentes. Asimismo, se revisó que las inscripciones consideradas para la estimación de precios de mercado de DAA dispusieran de los antecedentes correspondientes para asegurar una estimación fidedigna. Los criterios utilizados para la estimación se muestran a continuación:

- Tipo de transacción: de mercado.
- Naturaleza del derecho: subterráneo y superficial, dependiendo del caso;
- Tipo de derecho; consuntivo y no consuntivo;
- Caudal: volumen por unidad de tiempo;
- Valor total de la transacción: monto en pesos y UF.

Asimismo, sobre la base de la información disponible se identificaron y excluyeron las inscripciones que no dispusieron de las especificaciones indicadas. Una segunda etapa del proceso de sistematización de la información implicó la identificación y exclusión de los valores atípicos. Tal como lo requiere la propia metodología de SISS, una vez depurada la base de datos, se realizó un análisis de identificación de valores atípicos en relación a la distribución del precio unitario de "l/s". En este proceso de eliminación de valores atípicos se dejaron fuera de la muestra final las estimaciones de aquellos valores con errores y con información duplicada.

Una vez depurada la base de datos, la estimación de los precios de mercado fue realizada usando la media y la mediana.

### **3.4 METODOLOGÍA APLICADA EN LA OFERTA HÍDRICA**

Respecto de la oferta, se abordan en este apartado la metodología seguida en el diagnóstico de las fuentes superficiales, subterráneas y glaciares, a nivel de identificación, división administrativa y restricciones vigentes en torno al uso del agua. Seguidamente, se presenta la metodología de estimación de la oferta en la fuente (aguas superficiales) y stock, recarga y niveles (aguas subterráneas), para posteriormente exponer la metodología aplicada en el diagnóstico de la calidad de las aguas. Finalmente, se presentan los pasos seguidos en el análisis de los derechos concedidos.

#### **3.4.1 Fuentes**

##### **3.4.1.1 Identificación de fuentes**

La identificación de fuentes superficiales y subterráneas ha sido realizada a partir de fuentes de información secundarias vinculadas a la materia. Entre estas fuentes se encuentra la Dirección General de Aguas (DGA), además de otros estudios desarrollados por diversos autores.

Respecto a las fuentes superficiales, han sido reconocidos los tributarios y cuerpos de aguas más importantes en la cuenca. La información presentada considera además una representación cartográfica de la hidrografía de la cuenca. Respecto a las fuentes subterráneas se presenta una descripción del comportamiento hidrogeológico de la cuenca, considerando además la clasificación de unidades hidrogeológicas (UH) identificadas en el estudio "Actualización de Información y Modelación Hidrológica Acuíferos de la XII región, de Magallanes y la Antártica" de DGA (2016a). En cuanto a la caracterización glaciar, se han identificado el número de glaciares y sus principales características a partir del Inventario de Glaciares (DGA, 2014).

##### **3.4.1.2 División administrativa**

Los límites administrativos superficiales han sido reconocidos a partir de la clasificación de cuencas hidrográficas BNA (Banco Nacional de Aguas) y de la clasificación de cuencas hidrográficas DARH (Departamento de Administración de Recursos Hídricos de la DGA). De esta manera, los límites fueron reconocidos a partir de las capas, en formato vectorial (SHP), "Subcuenca\_BNA", "Subsubcuenca\_BNA", "Cuencas\_DARH\_Subcuencas" y "Cuencas\_DARH\_Subsubcuencas". A partir de las capas antes mencionadas se identificó la superficie que abarca la subcuenca y las subsubcuencas que la conforman. La información presentada considera además una representación cartográfica de dichos límites.

Resto a la delimitación administrativa subterránea, se utilizó la capa "Otros\_Acuíferos" que dispone la Mapoteca DGA. A partir de esta información se ha reconocido la superficie que comprende cada uno de los sectores acuíferos de la cuenca. La información presentada considera además una representación cartográfica de dichos límites.

### **3.4.1.3 Restricciones al uso**

Se ha indagado sobre las restricciones al uso de agua existentes en la cuenca en sus diferentes figuras, dictadas por la administración pública. Los resultados de esta recopilación y análisis se presentan en el acápite 4.1.1.3 del Informe Final (relativo a restricciones de uso de fuentes superficiales) y en el acápite 4.2.1.3 del Informe Final (relativo a restricciones de uso de fuentes subterráneas).

A continuación, se detallan cada uno de estos casos considerados.

- **Declaración de agotamiento de aguas superficiales**

La declaración de agotamiento es un instrumento que dispone la DGA, facultad establecida en el Artículo 282 del Código de Aguas, para señalar que, en la fuente natural de agua superficial respectiva, sea un río, lago, laguna u otro, se agotó la disponibilidad del recurso hídrico para la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas superficiales de tipo consuntivo y ejercicio permanentes. Esta declaración no impide la constitución de nuevos derechos de tipo no consuntivo o consuntivo de ejercicio eventual.

- **Áreas de restricción de aguas subterráneas**

La declaración de área de restricción de aguas subterráneas (Código de Aguas 1981, Artº 65) es un instrumento utilizado por la Dirección General de Aguas para proteger Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) donde exista grave riesgo de descenso en los niveles de agua con el consiguiente perjuicio a los derechos de terceros establecidos en él, o bien, cuando los informes técnicos emitidos por el Servicio demuestren que está en peligro la sustentabilidad del acuífero. Una vez emitida esta declaración, la DGA sólo podrá otorgar derechos de aprovechamiento con carácter provisional.

- **Zonas de prohibición de aguas subterráneas**

La declaración de zona de prohibición (Código de Aguas 1981, Artº 63) es un mecanismo mediante el cual la Dirección General de Aguas protege la sustentabilidad de un acuífero. Esta declaración, a diferencia del área de restricción, se produce cuando la disponibilidad del recurso hídrico se encuentra totalmente comprometida tanto en carácter de definitivo como provisional, por lo que no es posible constituir nuevos derechos de aprovechamiento.

- **Zonas de conservación**

Las zonas de conservación bajo protección oficial son las consideradas "áreas protegidas". Las áreas protegidas a nivel nacional son "porciones de territorio, delimitadas geográficamente y establecidas mediante un acto administrativo de autoridad competente, colocadas bajo protección oficial con la finalidad de asegurar la diversidad biológica, tutelar la preservación de la naturaleza o conservar el patrimonio ambiental". En la Figura 3.4-1 se muestra las áreas protegidas y su grado de homologación de la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). Además de las indicadas en dicha figura, a nivel internacional, existen otras figuras de conservación presentes en Chile: los Sitios Ramsar y las Reservas de la Biosfera.

Área Protegida / Categoría UICN	Ia	Ib	II	III	IV	V	VI
Parque Marino	■						
Reserva de Regiones Vírgenes		■					
Parque Nacional			■				
Monumento Natural				■			
Santuario de la Naturaleza				■	■		
Reserva Forestal					■		■
Reserva Nacional					■		■
Reserva Marina					■		■
Áreas Marinas Costera de Múltiples Usos							■

Fuente: MMA (2020).

**Figura 3.4-1 Áreas protegidas chilenas y su grado de homologación de UICN**

- **Decretos de reserva**

El Decreto de Reserva es una facultad del presidente de la República que permite, a través de un decreto fundado, reservar el recurso para el abastecimiento de la población por no existir otros medios para obtener el agua, o bien, tratándose de solicitudes de derechos no consuntivos y por circunstancias excepcionales y de interés nacional; esta facultad está establecida en el Artículo 147 bis inciso 3° del Código de Aguas. Para lo anterior, es posible disponer la denegación parcial de solicitudes de derechos de aprovechamiento en tramitación.

- **Decretos de escasez hídrica**

Los decretos de escasez, facultad establecida en el Artículo 314 del Código de Aguas, se dictan con el objeto de proveer determinadas herramientas a usuarios del agua y a la población en general para reducir al mínimo los daños derivados de la sequía. Básicamente permiten a la DGA redistribuir las aguas disponibles en las fuentes naturales, en caso que no exista acuerdo entre los usuarios, y autorizar extracciones de aguas superficiales o subterráneas sin necesidad de constituir derechos de aprovechamiento de aguas, entre otras.

El Decreto de Escasez Hídrica del MOP no provee recursos económicos, y es independiente de atribuciones de otros Servicios, como la Declaración de Emergencia Agrícola del Ministerio de Agricultura, que sí considera aportes económicos; o la Declaración de Zona de Catástrofe por Escasez Hídrica del Ministerio del Interior, siendo efectivamente esta última declaración la que permite la contratación de camiones aljibes.

### **3.4.2 Oferta en la fuente (aguas superficiales)**

La oferta hídrica se determinará a partir de los resultados de los modelos numéricos, considerando nula demanda. La información de caudal generado como oferta natural del sistema se presenta para las estaciones fluviométricas de cada cuenca.

Para la generación de la oferta al momento actual (año 2020) y proyección futura (años 2030 y 2050), se ha considerado tomar los siguientes criterios:

- Oferta año 2020: promedio entre 2010 y 2020;
- Oferta año 2030: promedio entre 2020 y 2030;
- Oferta año 2050: promedio entre 2040 y 2050.

Para mayor detalle de la obtención de la oferta hídrica en la cuenca, ver apartado relativo a Modelación Hidrológica (acápite 3.5 del presente Anexo F).

### **3.4.3 Stock, recarga y niveles (aguas subterráneas)**

La metodología para determinar el stock del acuífero, la recarga al sistema subterráneo, y los niveles freáticos del sistema, se presenta en los siguientes puntos:

**Stock de acuífero:** El cálculo del volumen de agua contenido en el acuífero se realizará considerando de la suma total de las celdas que componen el dominio activo del modelo subterráneo del modelo integrado WEAP-GWV, y su procesamiento en plataforma GIS, considerando el coeficiente de almacenamiento de cada sector.

**Recarga al sistema subterráneo:** La estimación de la recarga efectiva ingresada al modelo subterráneo se realizará mediante la herramienta zona Budget del código MODFLOW, mediante la cual se identificarán las entradas al sistema subterráneo, considerando el periodo 1990-2020.

**Curvas equipotenciales del sistema:** La estimación de las curvas equipotenciales en el dominio de modelación subterráneo del modelo integrado WEAP-GWV se realizará considerando la herramienta de interpolación de equipotenciales del software Groundwater Vistas, representando el periodo marzo 2020.

### **3.4.4 Calidad de las aguas**

Seguidamente se expone la metodología aplicada en el diagnóstico de la calidad de las aguas, que se compone de una caracterización hidroquímica, el análisis del estado actual y un análisis isotópico, de acuerdo a la disponibilidad de datos. Los resultados se presentan en el Informe Final, en los acápites 4.1.4 y 4.1.5 (relativos a aguas superficiales) y acápites 4.2.3 y 4.2.4 (relativo a aguas subterráneas).

#### 3.4.4.1 Caracterización hidroquímica

Para efectuar la caracterización hidroquímica de las aguas, se utilizó la información que aporta la red hidrométrica DGA.

En primer lugar, se estima el balance iónico de las muestras mediante el software *PHREEQC*, considerando los siguientes 21 parámetros de encontrarse disponibles:

- Aniones mayores y menores:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$
- Cationes mayores:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$
- Metales trazas: Al, B, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn
- Parámetros físico-químicos y otros: pH,  $T^\circ$ ,  $\text{O}_2$ .

Quedando como criterio que la muestra no supere el 10% del error en dicho indicador.

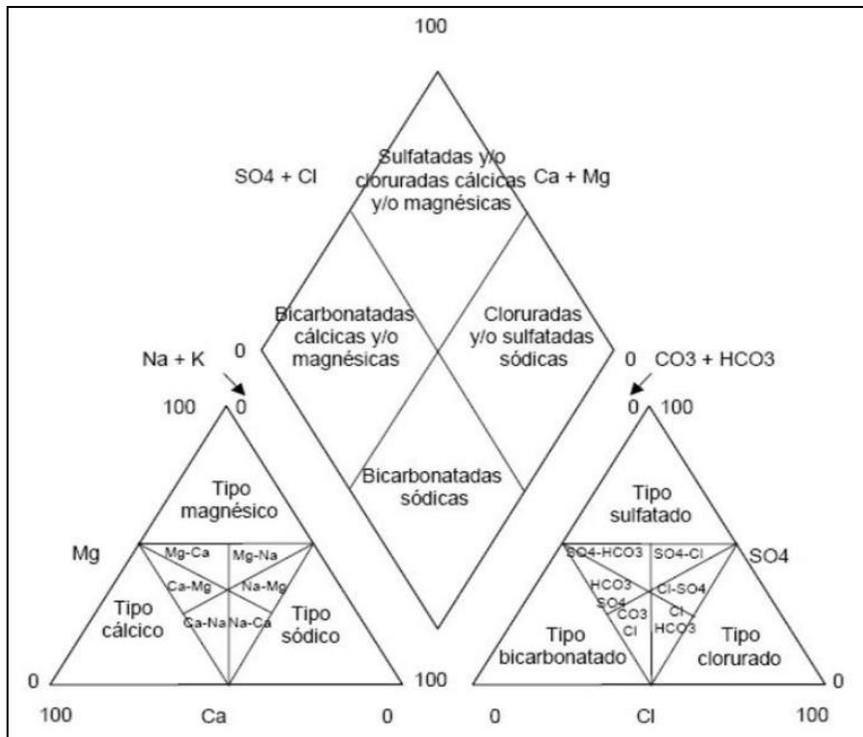
A su vez, en el caso de los parámetros de cada muestra que se encuentren bajo el límite de detección, se considera usar la mitad del valor dado por el límite de detección como concentración.

Así, se genera una base de datos hidroquímica con las muestras aptas para su procesamiento y comparación, efectuándose en primer lugar diagramas de Piper y Stiff, de ser posible, siendo necesario para ellos contar con al menos las concentraciones de los elementos mayores ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ). En el caso de los primeros, se utiliza el software *R* para generar dichos diagramas, separando las muestras según si son de aguas superficiales/subterráneas, y si corresponden a puntos de muestreo de la DGA, desarrollándose diagramas que permiten clasificar las aguas según su tipo, como se indica en la Figura 3.4-2.

De forma similar son desarrollados los diagramas de Stiff, para cada muestra. Esta vez se utiliza el software *AquaChem*, que permite superponer la estadística de cada punto de muestreo a lo largo del tiempo, según la siguiente simbología, y como se presenta en la Figura 3.4-3:

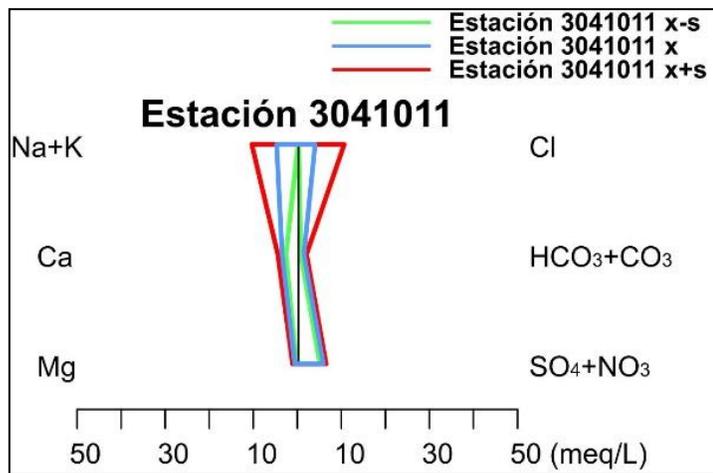
- Verde: Promedio menos desviación estándar ( $x-\sigma$ )
- Azul: Promedio ( $x$ )
- Rojo: Promedio más desviación estándar ( $x+\sigma$ )

Una selección de los diagramas de Stiff representativos por sectores son presentados en planta en un mapa de la cuenca de estudio, en lo posible a la misma escala y son con los valores promedio (línea azul), para diferencias no solo el tipo de agua respectivo, sino también la magnitud de las concentraciones absolutas de cada elemento mayor.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.4-2 Ejemplo de Diagrama de Piper**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.4-3 Ejemplo de Diagrama de Stiff**

### 3.4.4.2 Estado de la calidad

Seguido a eso, se procede a analizar el resto de los parámetros monitoreados que pudiesen ser de interés para la cuenca de estudio. Conforme a lo anterior, los parámetros considerados son los indicados en la Tabla 3.4-1.

**Tabla 3.4-1 Parámetros considerados en el diagnóstico del estado de calidad**

Parámetros	Símbolo	Nombre
Metales	As	Arsénico
	Al	Aluminio
	B	Boro
	Ca <sup>2+</sup>	Calcio
	Co	Cobalto
	Cr	Cromo
	Cu	Cobre
	Fe	Hierro
	Hg	Mercurio
	K <sup>+</sup>	Potasio
	Mg <sup>2+</sup>	Magnesio
	Mn	Manganeso
	Mo	Molibdeno
	Na <sup>+</sup>	Sodio
	Ni	Níquel
Pb	Plomo	
Zn	Zinc	
Inorgánicos	Cl <sup>-</sup>	Cloro
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Bicarbonato
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfato
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrato
Físico-químicos	pH	pH
	CE	Conductividad Eléctrica
	CV	Color Verdadero
Microbiológicos	CT	Coliformes totales
	EC	<i>Escherichia coli</i>
	Turb	Turbiedad

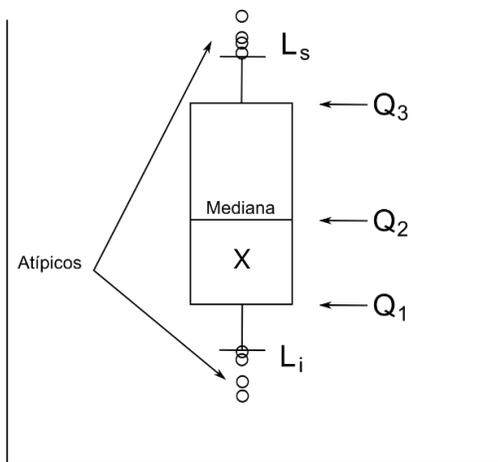
Fuente: Elaboración propia.

La razón de considerar estos parámetros en el análisis, por sobre el total de elementos presentes en la norma, es por su relación con actividades antrópicas. En el caso de los metales están los elementos tóxicos (As, Pb, Cr y Hg), como los elementos positivos en bajas concentraciones (Cu, Mo y Zn); en el caso de los parámetros inorgánicos, se consideraron aquellos con presencia en aguas residuales (Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) y aquellos con presencia en abonos o residuos industriales (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>); parámetros físico-químicos que permitan su clasificación según la normativa chilena actual (pH, CE y CV); y finalmente, parámetros microbiológicos (CT, EC y Turb), procedentes de contaminación antrópica.

La información que se entrega en el presente estudio es proporcionada de forma separada, según la procedencia del recurso hídrico (superficial o subterráneo):

- Aguas superficiales, con base en la configuración de la red hidrográfica de la cuenca y las estaciones hidrométricas correspondientes que proveen datos adecuados en calidad, cantidad y consistencia.
- Aguas subterráneas, con base en la delimitación física de las masas de agua existentes dentro de la cuenca y los pozos de la red hidrométrica que proveen datos adecuados en calidad, cantidad y consistencia.

La evaluación de la calidad de las aguas se efectuó a través de contraste gráfico entre el comportamiento de cada parámetro (a nivel de estación) y los límites establecidos en las normas chilenas de agua potable (NCh409/05, INN (2005)) y riego (NCh1333/78, INN (1978)), para lo anterior se utilizó gráficas tipo Box-Whiskers (Boxplot o gráfico de cajas) (Figura 3.4-4), generados con el software R. Estos diagramas se dividen según cuartiles, de manera que estos contengan el 25% ( $Q_1$ ), 50% ( $Q_2$ ) y 75% ( $Q_3$ ) de los datos. El espacio entre  $Q_1$  y  $Q_3$ , se denomina "caja", y contiene la mitad central de los datos. La medida de la caja o diferencia entre  $Q_3 - Q_1$  se denomina "rango intercuartílico (RIC)", mientras que el valor de  $Q_2$  corresponde a la mediana. La media se denota como una "X", la cual se puede ubicar tanto dentro como fuera de la caja. Las barras de error o bigotes se extienden hasta los valores máximos y mínimos de la serie de datos, o hasta 1,5 veces el RIC. Cuando hay datos que se extienden más allá de 1,5 veces el RIC, estos corresponden a valores atípicos u *outliers*. Entonces, se definen como límite inferior ( $L_i$ ) y límite superior ( $L_s$ ) a los valores  $Q_1 - 1,5 \times (RIC)$  y  $Q_3 + 1,5 \times (RIC)$  respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.4-4 Esquema de un Diagrama Box-Whiskers**

Los diagramas fueron generados para cada uno de los parámetros analizados por estación. Fueron representados los estadísticos básicos permitiendo determinar el cumplimiento de normativa, datos atípicos, límite superior e inferior, entre otros.

De la misma forma para los parámetros relevantes que tengan una cantidad de muestras suficientes (más de 20), se añaden los diagramas temporales para ver la evolución de un parámetro a lo largo de los años, para identificar tendencias al alza

o a la baja. Estos diagramas son extraídos desde el Mapa Hidroquímico de Chile (DGA, 2019b).

La determinación de rangos de análisis para parámetros físico-químicos se presentan en la Tabla 3.4-2; también es usado el rango presente en la norma chilena relativa a la calidad del agua de riego (NCh1333/78) con límites de mínimo 6,5 y máximo 8,5 unidades para el pH.

**Tabla 3.4-2 Rangos límites de parámetros CE y SDT**

<b>Clasificación</b>	<b>Rango</b>	<b>Conductividad Específica (c): mohos/cm a 25°C</b>	<b>Sólidos Disueltos Totales (s) mg/l a 105°C</b>
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales	C1	$c < 750$	$s < 500$
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	C2	$750 < c < 1500$	$500 < s < 1000$
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadoso	C3	$1500 < c < 3000$	$1000 < s < 2000$
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	C4	$3000 < c < 7500$	$2000 < s < 5000$

Fuente: Tabla N°2 de la Norma Chilena Oficial N°1.333 (NCh1333/78) modificada ((INN), 1978).

#### **3.4.4.3 Análisis isotópico**

Finalmente, no se ha encontrado información disponible de isótopos de agua en los puntos de muestreo en las cuencas estudiadas.

#### **3.4.5 Fuentes de contaminación**

El análisis de las fuentes de contaminación se realiza en base al estado de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, la distribución de los distintos parámetros estudiados en la cuenca, el contexto geológico y las actividades antropogénicas que se desarrollan. De esto se desprenden las brechas observadas en relación a la calidad de las aguas de la cuenca.

#### **3.4.6 Derechos concedidos**

La metodología de análisis de los DAA se ha presentado en el acápite 3.3.2 del presente Anexo F.

### **3.5 METODOLOGÍA APLICADA EN LA MODELACIÓN Y EL BALANCE DE AGUA**

La simulación hidrológica se ha realizado mediante el acople de los modelos WEAP (superficial) y el código MODFLOW en Groundwater Vistas (subterráneo). La metodología y plataformas utilizadas para alcanzar un acople efectivo se presenta en los acápites siguientes.

#### **3.5.1 Descripción de la Plataforma WEAP**

WEAP (<http://www.weap21.org/>) es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos desarrollada por el Stockholm Environment Institute (<http://www.sei-us.org/>) sede en Boston y el Tellus Institute (<http://www.tellus.org/>). Proporciona un marco flexible y de fácil uso para la planificación del recurso hídrico y análisis de escenarios.

WEAP permite apoyar la planificación de recursos hídricos mediante el balance de la oferta hídrica (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico, a escala de subcuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal, con diferencias en las prioridades de demanda y oferta). Para llevar a cabo este balance hídrico, se utiliza una gama de diferentes objetos disponibles en WEAP y procedimientos accesibles a través de una interfaz gráfica. Esto permite su uso para analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores (stakeholders) de recursos hídricos, incluyendo aquellos relacionados con el clima, condiciones físicas de la cuenca, proyecciones de demanda, condiciones regulatorias, objetivos de operación e infraestructura disponible.

WEAP es habitualmente forzado por variables climáticas, a diferencia de modelos de operación y gestión de recursos hídricos que se basan en modelación hidrológica externa, es decir, que separan el modelo hidrológico del operacional. Por otra parte, WEAP incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua a diferentes tipos de usuarios, desde una perspectiva humana y ecosistémica. Estas características convierten a WEAP en un modelo apropiado para realizar estudios de cambio climático, donde es importante estimar cambios en la oferta de agua (ej. cambios en la precipitación proyectados) y demanda de agua (ej. cambios en la demanda a partir de variación del área de los cultivos), y como estos cambios convergen en un balance de agua diferente al correspondiente al escenario base o actual.

Si bien WEAP fue creado como una herramienta para la modelación operacional de sistemas de recursos hídricos, incluyendo elementos tales como centrales hidroeléctricas, demandas de riego, canales, embalses, etc., actualmente se ha ampliado su capacidad incluyendo módulos de hidrología (distintos métodos de cálculo de precipitación-escorrentía), calidad de agua y aguas subterráneas mediante el uso de enlaces con otro software de uso común (e.g. MODFLOW).

### 3.5.1.1 Balance hidrológico en WEAP

WEAP resuelve numéricamente dos balances de masas planteados en cada estanque. Estos balances pueden ser resumidos mediante la Ec. 3 y la Ec. 4.

$$Z_{1max} \frac{dZ_1}{dt} = \left[ P_e(t) - ET_0 k_c \frac{5Z_1 - 2Z_1^2}{3} \right] - P_e(t) Z_1^{FR} - f K_1 Z_1^2 - K_2 (1 - f) Z_1^2 \quad \text{Ec. 3}$$

$$Z_{2max} \frac{dZ_2}{dt} = K_2 (1 - f) Z_1^2 - K_2 Z_2^2 \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

Pe: Precipitación, además de derretimiento.

f: Dirección preferencial del flujo.

Kc: Coeficiente de cultivo.

Z<sub>1max</sub>: Capacidad de caja superior

Z<sub>2max</sub>: Capacidad de caja inferior

Z<sub>1</sub>: Porcentaje de utilización inicial de la caja superior.

Z<sub>2</sub>: Porcentaje de utilización inicial de la caja inferior.

K<sub>1</sub>: Conductividad zona radicular

K<sub>2</sub>: Conductividad zona profunda.

El cálculo de la evapotranspiración (ET<sub>0</sub>) se realiza mediante el método de Penman-Monteith, resumido según la Ec. 5.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

ET<sub>0</sub>: Evapotranspiración de referencia.

R<sub>n</sub>: Radiación neta.

G: Densidad de flujo de calor del suelo.

T: Temperatura media diaria.

u<sub>2</sub>: Velocidad del viento a dos metros sobre el suelo.

e<sub>s</sub>: Presión de saturación de vapor de agua.

e<sub>a</sub>: Presión de vapor.

Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor.

γ: Constante psicométrica.

Este método se encuentra implementado en el software de acuerdo a los siguientes supuestos:

- Ecuación se estandariza para pasto de 0,12 m de altura y de resistencia superficial de 69 s/m.
- El albedo varía dentro de un rango de 0,15 a 0,25, como función de la cobertura de nieve.
- El término G se asume nulo.

Además, cabe destacar que la evapotranspiración potencial o de referencia, ET<sub>0</sub>, en WEAP se denomina *Reference PET*.

La evapotranspiración en el modelo WEAP se genera desde el estanque superior. Por esto, el volumen de agua almacenado allí influye directamente en la satisfacción de la demanda evapotranspirativa y debe ser observado con cuidado en el proceso de calibración ya que distintas soluciones, correctas en la simulación de caudal, pueden entregar valores irreales de evaporación.

En el caso de zonas de riego, la evapotranspiración se calcula a partir de un  $K_c$  que se obtiene de lo considerado en el modelo base y literatura, según tipo de cultivos, mientras que en cuencas laterales aportantes en estado natural, se utiliza un valor de  $K_c$  que no tiene significado desde el punto de vista agronómico. Por esto último, al utilizar esta simplificación en los catchments modelados según el método de humedad de suelo, podrían estar incluidas dentro del total otros procesos como evaporación directa desde suelo, sublimación, entre otros. De esta forma, el  $K_c$  en estos casos podría presentar valores no necesariamente concordantes con los rangos clásicos de literatura agronómica.

Otro proceso de importancia en la simulación del proceso físico corresponde a la acumulación y derretimiento de nieve. Esto se hace mediante la utilización de dos parámetros a calibrar denominados temperatura de congelamiento ( $T_c$ ) y derretimiento ( $T_d$ ). Teóricamente ambos corresponden a  $0^\circ\text{C}$ ; sin embargo, debido a fenómenos que están siendo dejados de lado en la modelación a nivel mensual,  $T_c$  y  $T_d$  son generalmente calibrados en un rango que va de  $-5$  a  $5^\circ\text{C}$ , respectivamente (US-SEI, 2010).

Los coeficientes de derretimiento y congelamiento determinan la proporción de agua líquida y sólida en la precipitación y la fracción de cobertura nival que se derrite en cada paso de tiempo. La Ec. 6 resume este último fenómeno.

$$P_e(t) = (A_c(t) + P_p(t)m_c) \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$$m_c = \begin{cases} 0 & T_i < T_c \\ 1 & T_i > T_d \\ \frac{T_i - T_c}{T_d - T_c} & T_c < T_i < T_d \end{cases} \quad \text{Ec. 7}$$

$P_e$ : Aportes a la escorrentía de precipitación líquida y derretimiento de nieve.

$A_c$ : Cobertura nival en unidades de longitud.

$P_p$ : Precipitación total.

$T_i$ : Temperatura media mensual del mes  $i$ .

### 3.5.1.2 Elementos disponibles en WEAP

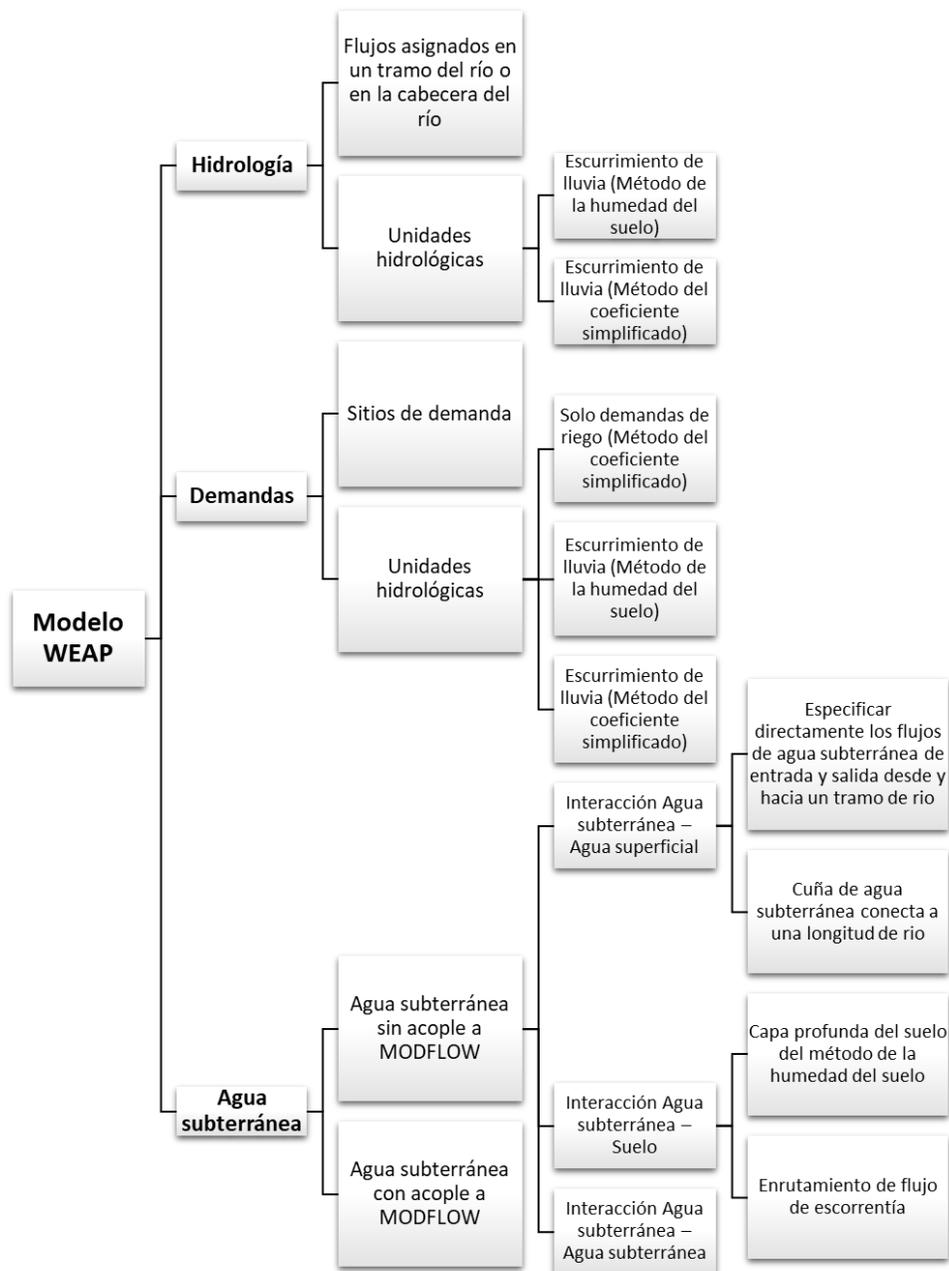
Existen numerosos elementos de gestión en WEAP, los cuáles pueden resumirse en:

- Ríos (River)
- Derivación (Diversion)
- Embalses (Reservoir)
- Agua subterránea (Groundwater)

- Otras fuentes (Other Supply)
- Sitio de Demanda (Demand Site)
- Unidad hidrológica (Catchment)
- Planta de tratamiento de Aguas (WasteWater Treatment Plant)
- Escorrentía/Infiltración (Runoff-Infiltration)
- Conducción (Transmission Link)
- Flujo de Retorno (Return Flows)
- Centrales Hidroeléctrica de Pasada (Hydropower)
- Requerimiento de Caudal (Flow Requirement)
- Medidor de Caudal (Streamflow Gauge)

Dado que este capítulo no busca entregar un manual de aplicación de WEAP, para lo cual están los propios manuales y tutoriales disponibles en su sitio oficial, aquí se ahonda en aquellos elementos básicos que resultan fundamentales para el modelo en particular implementado en este plan estratégico. Para una descripción más completa de todos los elementos, se recomienda la revisión del documento elaborado por DICTUC (DGA, 2019<sup>a</sup>) o bien la guía del usuario de WEAP en <https://www.weap21.org/index.asp?action=208> (SEI, n.d.).

Basándose en la misma referencia, es prudente entender que en WEAP existen tanto elementos como métodos. La escorrentía en un río puede ser modelada, por ejemplo, a través de una relación o modelo de precipitación -escorrentía dentro de WEAP considerando al menos 5 métodos, o bien, puede ser ingresada a través de un archivo de texto, como una serie operacional estimada “fuera” del modelo. La Figura 3.5-1 elaborada por DICTUC (DGA, 2019<sup>a</sup>) resume de buena manera los métodos de generación de escorrentía y también.



Fuente: DGA (2019<sup>a</sup>), "Desarrollo de Herramienta para el Análisis de Gestión en el Marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos, SIT N° 445 (Realizado por: DICTUC S.A. & SEI).

**Figura 3.5-1 Elementos y métodos disponibles en WEAP para la modelación de la hidrología, demandas de agua y agua subterránea**

## **i. Hidrología**

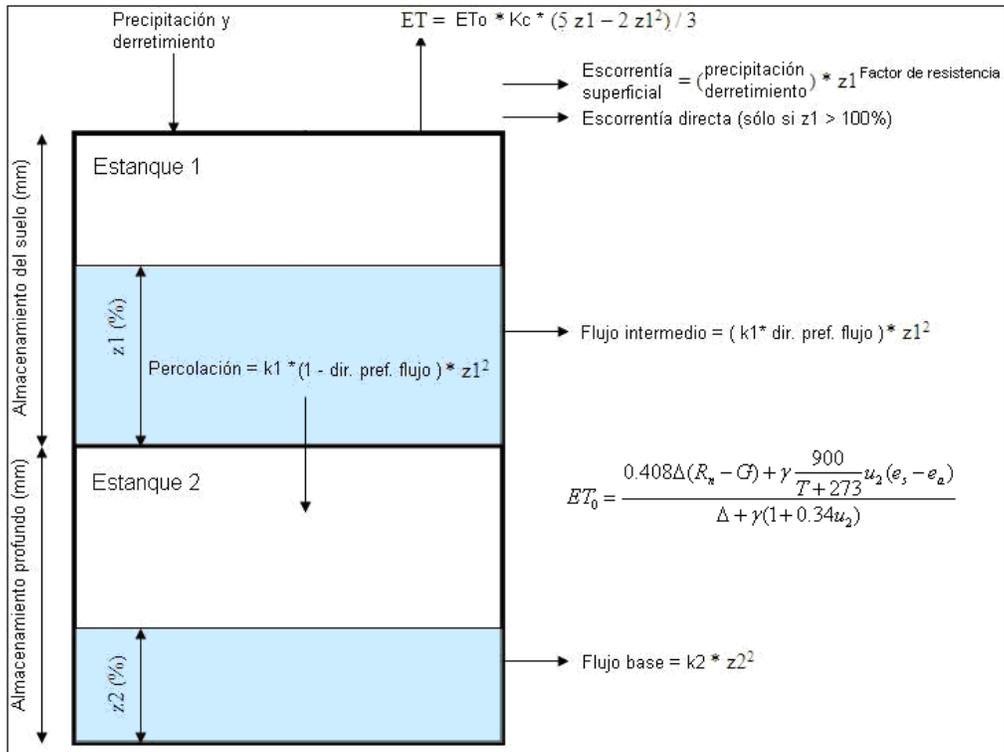
En WEAP existen métodos y elementos relacionados a la producción hidrológica, siendo los más relevantes los ríos y unidades hidrológicas.

En el caso de los ríos, estos son elementos que actúan como “tuberías”, transportando el flujo de un lugar a otro. En la medida que se les va incorporando interacciones con otros elementos éstos comienzan a subdividirse en tramos, en donde se les pueden definir pérdidas por infiltración hacia elementos acuíferos, así como pérdidas totales del sistema. Estos elementos pueden “unirse” para formar confluencias y constituyen un elemento básico desde donde se definen otros elementos como derivaciones, requerimientos de flujo y estaciones fluviométricas de control.

Un elemento esencial es la unidad hidrológica o “catchment”. Este elemento integra diferentes modelos hidrológicos incorporados en WEAP, algunos muy simples y otros más complejos, y por ende sintetiza tanto la información de clima como de uso de suelo dependiendo del método escogido. En este trabajo se ha utilizado principalmente el método de la humedad del suelo (Soil Moisture Method) como el método del coeficiente simplificado para las áreas de riego.

El módulo hidrológico integrado de la humedad del suelo que se utiliza en este estudio se basa en un esquema de dos estanques, capaces de reproducir distintas componentes de los flujos subterráneos y superficiales (Figura 3.5-2).

WEAP simula el proceso de precipitación-escorrentía a partir de una función de transferencia (que depende del módulo hidrológico seleccionado) en la que se determina una variable de salida (el caudal) a partir de una o varias variables de entrada, generalmente de carácter meteorológico (precipitación, temperatura, etc.). Internamente el modelo utiliza numerosos parámetros para representar el fenómeno físico. En la se muestra una clasificación general de las variables involucradas.



Fuente: Ayala (2011), modificado a partir de Guía de Uso WEAP.

**Figura 3.5-2 Esquema gráfico modelo WEAP**

Donde:

Pp: Precipitación líquida.

ET: Evapotranspiración real.

ET<sub>0</sub>: Evapotranspiración potencial.

Z<sub>1</sub>: Porcentaje de la capacidad del estanque superior utilizada.

Z<sub>2</sub>: Porcentaje de la capacidad del estanque inferior utilizada.

K<sub>1</sub>: Conductividad del estanque superior.

K<sub>2</sub>: Conductividad del estanque inferior.

Dir pref flujo: Dirección preferencial de flujo. Determina la fracción de flujo vertical y horizontal.

**Tabla 3.5-1 Variables y parámetros utilizados por el modelo WEAP**

<b>Tipo de Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Nombre Parámetro</b>
Uso de suelo	Variables de entrada	- Área de la cuenca (catchment) - Coeficiente de cultivo (kc)
	Parámetros internos del modelo (a calibrar)	- Almacenamiento del suelo, estanque superior (z1 max) - Almacenamiento profundo, estanque inferior (z2 max) - Conductividad de la zona radicular o estanque 1 (K1) - Conductividad de la zona profunda o estanque 2 (K2) - Factor de resistencia al escurrimiento (FR) - Dirección preferencial del flujo - Almacenamiento inicial en el estanque 1 (z1 inicial) - Almacenamiento inicial en el estanque 2 (z1 inicial)
Clima	Variables de entrada	- Series de precipitación - Series de temperatura - Latitud - Humedad relativa - Viento - Fracción nublada o nubosidad - Radiación - Albedo de la nieve
	Parámetros internos del modelo (a calibrar)	- Nivel de nieve inicial - Temperatura de fusión de la nieve - Temperatura de derretimiento de la nieve - Albedo de nieve vieja - Albedo de nieve nueva
Cauces naturales	Variables de entrada	- Series históricas de caudal (Ríos)
Reservorios	Variables de entrada	- Curva de Volumen vs Elevación del reservorio - Serie de evaporación observada - Serie de volúmenes observados en la laguna

Fuente: Elaboración Propia.

Respecto del método del coeficiente simplificado, este utiliza coeficientes del cultivo para calcular la evapotranspiración potencial. De cumplirse las condiciones de escorrentía, el excedente de la precipitación (escorrentía) puede fluir a un río y/o hacia un nodo de agua subterránea.

Las variables de entrada son menos que las del método anterior, En el caso del clima, recibe aparte de la precipitación la evapotranspiración de referencia y

adicionalmente es necesario definir la precipitación efectiva (Porcentaje de la precipitación disponible para la escorrentía).

Los parámetros de suelo son el coeficiente de cultivo "kc" y la superficie.

## **ii. Demandas**

En el caso de las demandas, éstas pueden ser representadas tanto por "Nodos de demanda" o "Demand Site" o por medio del elemento "unidad hidrológica" en la medida que se desee.

Usualmente, las demandas asociadas a: Industria, consumo humano o agua potable, minería, agricultura, ecológicas y de recreación pueden ser representadas a través del "nodo de demanda". La demanda de riego puede representarse con el método anterior o a través de una unidad hidrológica.

Respecto del nodo de demanda, se tienen dos métodos, los cuales permiten tanto especificar la demanda mensual a través de una serie de tiempo, o a través de la definición de un "tipo" de demanda, en donde se requiere representar el nivel de actividad anual (como puede ser la población, número de hectáreas, etc), una tasa anual, más conocido como "dotación", y la variación mensual, que reparte a lo largo del año, la demanda total, una suerte de la renombrada curva "S" de la demanda que sirve para representar los consumos mínimos y máximos y en que parte del año se producen.

En el caso del método del coeficiente simplificado, sumado a los parámetros ya destacados en el acápite anterior, se agregan el riego, fracción de riego y tasa de reúso. Este método utiliza los coeficientes de cultivo para calcular la evapotranspiración potencial y así determinar la demanda de riego que se requiera. Cabe destacar que estos mismos parámetros se agregan en el caso que el método de generación de escorrentía sea el de la humedad del suelo.

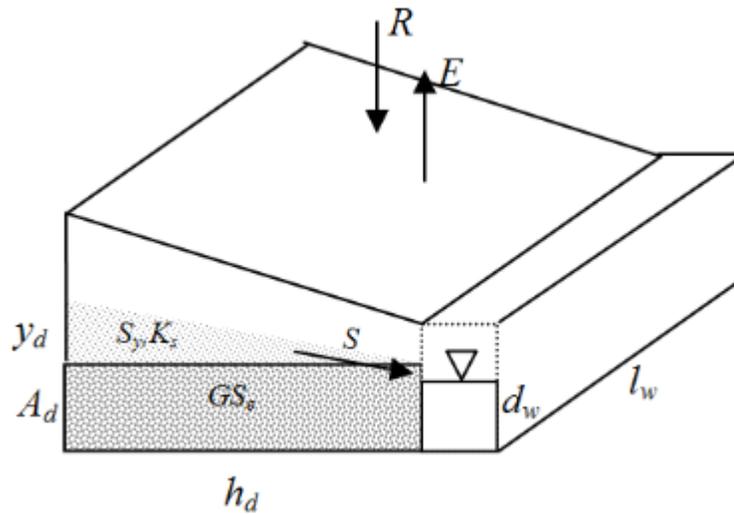
Cuando se agrega más de un vínculo de escorrentía/infiltración desde la unidad hidrológica, sean ríos o nodos de agua subterránea, es necesario indicar el porcentaje en que se debe distribuir la escorrentía (fracción de escorrentía) (DGA, 2019<sup>a</sup>).

## **iii. Agua subterránea**

La interacción entre el río y el acuífero puede ser modelada de diferentes formas en WEAP. Producto de la complejidad del sistema y la necesidad de conectar los acuíferos de los sistemas existentes, es posible modelar el acuífero con un módulo especial, el cual permite incorporar la mayoría de la información recopilada en antecedentes relativos a espesores, anchos, volúmenes y conductividad hidráulica de los acuíferos.

En el caso de los elementos de agua subterránea, es conveniente relevar 3 métodos para la condición sin acople y el acople con Modflow propiamente tal.

En el caso que se desee modelar la interacción río-acuífero a través de WEAP, el método más conocido es el método de la "cuña". Este módulo representa al acuífero como un prisma, de geometría regular, que reemplaza al estanque inferior del modelo conceptual de la Figura 3.5-2. Este esquema tiene como función principal resolver el balance hídrico del acuífero, y su interacción con el río, pero no simula niveles. La Figura 3.5-3, presenta el modelo conceptual del acuífero en WEAP, el que además es simétrico respecto del eje del río.



Fuente: Manual del Usuario de WEAP.

**Figura 3.5-3 Modelo Conceptual del acuífero en WEAP. Fuente: Manual WEAP**

La Tabla 3.5-2 presenta el detalle de los parámetros del modelo conceptual del acuífero en WEAP.

**Tabla 3.5-2 Parámetros de acuífero en WEAP**

Nombre de Parámetro	Abreviación	Descripción
Almacenamiento del Acuífero	$GS_e$	Volumen almacenado en el acuífero, ya sea inicial o en un paso de tiempo fijo. [ $Mm^3$ ]
Ancho medio del acuífero	$h_d$	Distancia representativa entre el eje del río hacia la extensión más alejada del acuífero, es decir, su ancho máximo. [m]
Perímetro mojado	$l_w$	Perímetro de contacto entre el acuífero y el río [m]
Profundidad de Equilibrio	$A_d$	Profundidad que alcanza el acuífero en su condición de equilibrio.
Altura de escurrimiento	$d_w$	Altura de escurrimiento del río [m]. Valor usado como referencia de comparación para las simulaciones de elevación del acuífero.

Nombre de Parámetro	Abreviación	Descripción
Conductividad Hidráulica	K <sub>s</sub>	Conductividad Hidráulica del acuífero. [L/T]
Porosidad Específica	S <sub>y</sub>	Porosidad Específica (Specific Yield).

El volumen del acuífero es estimado inicialmente a partir del supuesto que el nivel de agua en el acuífero se encuentra en equilibrio con el río; entonces el almacenamiento de equilibrio hacia un lado del río, denominado GS<sub>e</sub>, se calcula como:

$$GS_e = h_d l_w A_d S_Y \quad \text{Ec. 8}$$

La variable "y<sub>d</sub>" es una estimación de la altura sobre la cual el acuífero se encuentra por sobre o bajo el equilibrio, por lo que el almacenamiento inicial GS(0) en el acuífero, es decir el almacenamiento en t=0, está dado por la expresión:

$$GS(0) = GS_e + y_d h_d l_w S_Y \quad \text{Ec. 9}$$

De esta forma, la altura del acuífero que está por sobre o bajo el equilibrio se puede determinar cómo:

$$y_d = \frac{GS - GS_e}{h_d l_w S_Y} \quad \text{Ec. 10}$$

Mientras más aumente el nivel de agua relativo al lecho del río, mayor será entonces el aporte o filtración desde el acuífero hacia este. Por el contrario, al disminuir el nivel de agua respecto de la ubicación de la altura de equilibrio del río, mayor será la infiltración desde el río hacia el acuífero. La infiltración total (S) desde ambos lados del río puede ser descrita como:

$$S = 2 \left( K_S \frac{y_d}{h_d} \right) l_w d_w \quad \text{Ec. 11}$$

Donde K<sub>s</sub> representa la conductividad hidráulica saturada del acuífero y d<sub>w</sub> es una estimación de altura de escurrimiento del río, invariante en el tiempo. Tanto la altura de escurrimiento (d<sub>w</sub>) como el perímetro de contacto (l<sub>w</sub>) representan el área por donde ocurre la filtración. La conductividad hidráulica es la encargada de controlar la tasa a la cual el agua se mueve hacia o desde el área de filtración. Una vez que esta filtración es estimada, el almacenamiento del acuífero al final del paso de tiempo adoptado se estima como:

$$GS_i = GS_{i-1} + 0.5 (R - E - S) \quad \text{Ec. 12}$$

Donde E representa cualquier extracción antropogénica desde el acuífero destinada a la satisfacción de un nodo de demanda y R representa la recarga provista por la precipitación.

Otra manera de simular el acuífero corresponde al método de "especificar los flujos GW". En este método, se deben imponer los volúmenes del acuífero, así como su recarga natural y flujo desde un acuífero a otro y al caudal máximo de extracción. Usualmente este método es utilizado en el caso en que se tiene información de un modelo subterráneo, pero no se ha optado por el acople y existe información relativa a extracciones del acuífero. Cabe destacar que dicho método permite incluso la modelación de una "caja" de capacidad infinita.

Una manera simplificada de la representación del acuífero corresponde a la interacción entre los estanques superior (zona radicular) e inferior (caja acuífera) del modelo de la humedad del suelo. En este caso el acuífero se parametriza con una caja con una capacidad finita, una conductividad hidráulica y un nivel inicial. Este método tiene la limitación inherente que no permite la separación de ambos elementos por sí sólo, teniéndose que calcularse aparte flujos relevantes como la infiltración o percolación.

Cabe destacar que es factible acoplar una caja acuífera al método de la humedad del suelo. En dicho caso, los parámetros del estanque inferior son reemplazados por los de la caja acuífera. Este método requiere por cierto de mucha información y es extremadamente difícil de calibrar.

El último método corresponde justamente al acople WEAP-MODFLOW, que se discutirá más adelante.

### **3.5.2 Descripción de MODFLOW**

Es un software de modelamiento tridimensional de agua subterránea, el cual resuelve las ecuaciones de flujo mediante diferencias finitas, elementos finitos (MODFLOW 2000,2005, NWT) y volúmenes finitos (MODFLOW USG). En el acople con WEAP solamente están permitidos el primer set de motores MODFLOW: MODFLOW 2000,2005, NWT. El código es continuamente desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), existiendo diferentes versiones que han ido incorporando cálculos específicos y nuevas formulaciones de resolución. Al ser desarrollado por una institución pública, modflow es de código libre, es decir se distribuye gratuitamente.

Es considerado internacionalmente como un código estándar en cuanto a la representación del flujo regional o local del agua subterránea y su interacción con los cuerpos de agua superficial. Presenta una estructura modular, es decir contiene componentes llamados "paquetes" que son acoplados a Modflow con los cuales son resueltos aspectos específicos de los componentes del flujo subterráneo, tales como los paquetes de resolución de pozos o río.

#### **3.5.2.1 Plataformas que corren MODFLOW**

Modflow corresponde a un código libre, sin embargo, su utilización no es sencilla. Para ello se han desarrollado múltiples plataformas que, utilizando el código modflow original, permiten tanto la construcción del modelo, considerando la representación gráfica de las condiciones geométricas y propiedades hidráulicas del

área de estudio, como la presentación de sus resultados. Dentro de ellas, se destacan:

- Model Muse: programa de interfaz gráfica libre y de código abierto desarrollado por el USGS para la modelación de flujo y transporte en aguas subterráneas.
- Visual Modflow: programa desarrollado por Waterloo Hydrogeologic, el cual en su lanzamiento el año 1994 se convirtió en la primera interfaz gráfica comercial del código MODFLOW. Utilizado para la modelación tanto de flujo como transporte, soporta las diferentes versiones de MODFLOW y sus respectivos paquetes.
- Groundwater Vistas: corresponde a un software comercial de modelación de flujos subterráneos y transporte de contaminante desarrollado por ESI (Environmental Simulation Incorporated) que sustenta varios códigos, destacándose MODFLOW, MT3MS y SEAWAT, entre otros. El programa es compatible con ArcView y Surfer, formatos con los cuales se facilita el manejo de la geometría y propiedades del modelo.

### **3.5.2.2 Motores y Paquetes disponibles en MODFLOW**

Modflow, desde su lanzamiento, ha sido continuamente desarrollado, existiendo seis grandes actualizaciones al código base: Modflow-84, Modflow-88, Modflow-96, Modflow-2000, Modflow-2005 y Modflow 6. Asociados a estas versiones bases se han desarrollado variantes con mejoras específicas en la resolución de las ecuaciones de flujo, destacándose:

- Modflow NWT: utiliza la formulación de Newton Raphson para mejorar la simulación de flujo en acuíferos libres.
- Modflow USGS: utiliza una grilla no estructurada para el cálculo de las ecuaciones de flujo.

Modflow presenta una estructura modular, por lo que cada una de las versiones desarrolladas se apoya en distintos paquetes para la resolución de ecuaciones y presentación de resultados, entre ellos:

- Flujo
- BCF6: Block-Centered Flow
- BAS6: Basic
- LPF: Layer Property Flow
- HUF2: Hydrogeologic Unit Flow
- UPW: Upstream Weighting
- NPF: Node Property Flow
- STO: Storage Package Pane
- HFB: Horizontal Flow Barrier
- UZF: Unsaturated-Zone Flow
- SWI2: Seawater Intrusion
- Condiciones de Borde
- CHD: Constant Head
- BFH: Boundary Flow and Head
- RCH: Recharge

- WEL: Well
- FHB: Flow and Head Boundary
- DRN: Drain
- DRT: Drain Return
- ETS: Evapotranspiration Segments
- EVT: Evapotranspiration
- GHB: General Head Boundary
- LAK: Lake
- MAW: Multi-Aquifer Well
- MNW1: Multi-Node Well
- MNW2: Multinode Well 2
- RES: Reservoir
- RIP: Riparian Evapotranspiration Package
- RIV: River
- SFR: Stream-Flow Routing
- STR: Stream
- Solvers
- PCG: Preconditioned Conjugate Gradient
- PCGN: Preconditioned Conjugate Gradient Solver with Improved Nonlinear Control
- GMG: Geometric Multigrid Solver
- SIP: Strongly Implicit Procedure
- DE4: Direct Solver
- NWT: Newton Solver
- LMG: Link AMG
- SOR: Slice Successive Overrelaxation
- Salida
- HYD: HYDMOD
- GAGE: Gage
- LMT6: Link MT3DMS
- MNWI: Multi Node Well Information
- Post Procesadores
- MODPATH
- ZONEBUDGET
- Subsistencia
- IBS: Interbed Storage
- SUB: Subsidence and Aquifer System Compaction
- SWT: Subsidence and Aquifer System Compaction for Water Table Aquifers
- Transporte
- BTN: Basic Transport
- ADV: Advection
- DSP: Dispersion
- SSM: Sink & Source Mixing
- RCT: Chemical Reactions
- GCG: Generalized Conjugate Gradient
- TOB: Transport Observation
- CTS: Contaminant Treatment Systems

- LKT: Lake Transport
- SFT: Stream Flow Transport
- UZT: Unsaturated-Zone Transport

### **3.5.2.3 Motores y Paquetes disponibles en MODFLOW para acople WEAP**

El proceso de acople se hace a través de la lectura en WEAP de los diferentes paquetes de Modflow, sin embargo, no todos son permitidos. Actualmente WEAP soporta las versiones Modflow 2000, Modflow 2005 y Modflow NWT. En cuanto a los paquetes, se diferencian aquellos que son utilizados por WEAP para el cálculo de la interacción de flujos subterráneos y superficiales y aquellos que son permitidos por WEAP, pero que son utilizados por Modflow en su cálculo interno. A continuación, se detallan los paquetes utilizados, permitidos, pero no utilizados y no permitidos por WEAP:

Paquetes utilizados por WEAP:

- BCF6
- BAS6
- HUF2
- LPF
- UPW
- CHD
- DRN
- RCH
- RIV
- WEL

Paquetes permitidos, pero no utilizados por WEAP:

- ADV2
- DE4
- GHB
- GAGE
- HFB
- HYD
- IBS
- LMG
- NWT
- PCG
- SIP
- SOR
- SUB
- ZONE

Paquetes no permitidos por WEAP:

- DAF
- DAFG
- DRT
- ETS

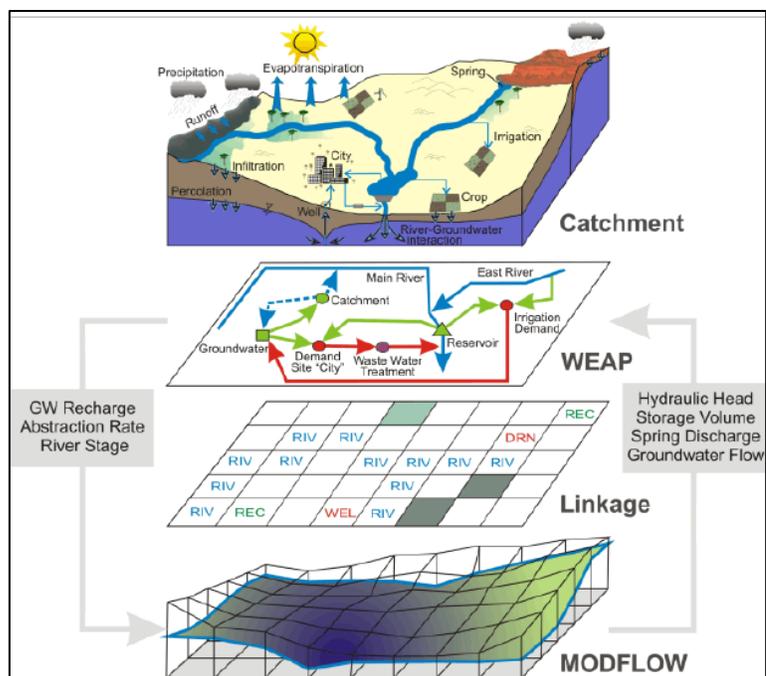
- EVT
- FHB
- LAK
- MNW1
- MNW2
- PES
- PVAL
- RES
- SEN
- SRF
- STR
- SWR
- UZF

### **3.5.3 Acople WEAP-MODFLOW**

Como ya se describió, es usual que los modelos hidrológicos realizados en WEAP representen la zona de almacenamiento inferior (sistema subterráneo), con un enfoque de estanque o de cuña; mediante representaciones simplificadas de geometría y propiedades de acuífero, que simulan intercambio de flujos a nivel agregado.

En este sentido, es importante recalcar que WEAP es un modelo conceptualizado con segmentación espacial concentrada o semidistribuida; mientras que el modelo de flujo MODFLOW representa la dinámica de flujo subterráneo de manera espacialmente distribuida. De esta manera, mediante la implementación de un archivo de enlace en WEAP, que permite representar el acuífero vinculado a MODFLOW, es posible integrar directamente los flujos superficiales y subterráneos, para todos los periodos de simulación, ejecutando simultáneamente un modelo distribuido y otro semidistribuido.

Para llevar a cabo lo anterior, se debe generar los archivos de modelación subterránea en el formato nativo de MODFLOW; para luego desarrollar el archivo de enlace que vincula los elementos de WEAP con la malla del modelo subterráneo. En la Figura 3.5-4 se presenta un esquema de vinculación entre WEAP y MODFLOW, extraída de los estudios de The Federal Institute for Geosciences and Nature Resources (BGR Hannover).



Fuente: BGR Hannover

**Figura 3.5-4 Esquema de Vinculación WEAP-MODFLOW Mediante Archivo de Enlace**

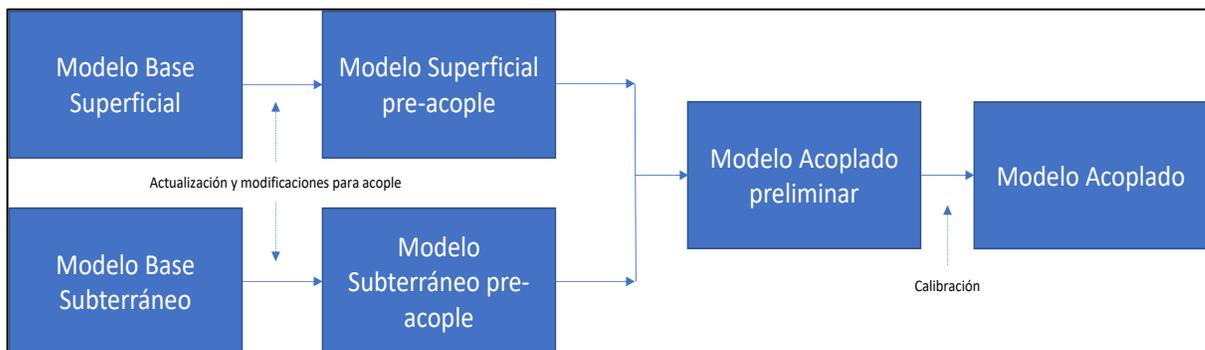
En el siguiente acápite se profundiza en el desarrollo de la herramienta de modelación integrada del recurso superficial-subterráneo, describiendo en el proceso de acople entre el software WEAP, que simula procesos de aguas superficiales; y el código de modelamiento MODFLOW, que simula los procesos de flujos de agua subterránea.

### 3.5.3.1 Esquema General Implementado en Modelos Acoplados

De acuerdo a lo indicado en la bibliografía especializada, (Sanzana *et al.*, 2018), para acoplar un modelo subterráneo y superficial, se recomienda contar con un modelo subterráneo previamente calibrado, siendo posible que en el proceso de integración sea necesario recalibrar parámetros. En este sentido, y dada la experiencia del consultor en modelo integrados iterativos como DGA-HID (2018c), el enfoque utilizado para llevar a cabo el proceso de acople se resume en los siguientes puntos y Figura 3.5-5.

- Una vez que se cuenta con los modelos bases superficial y subterráneo, se realizaran las modificaciones topológicas necesarias para el acople, de manera tal de representar y utilizar las condiciones de borde, motores de cálculo, y elementos que se encuentran disponibles para la operación conjunta de ambos modelos; como se ha descrito en el acápite 3.4.2.3. En este aspecto, es sumamente importante considerar que la calidad de los modelos base, en lo referente a su conceptualización e implementación numérica, condiciona directamente la calidad del modelo acoplado final.

- Ambos modelos modificados y actualizados a abril 2020 son operados en conjunto en régimen transiente, teniendo especialmente en cuenta que los flujos de interrelación entre ambos modelos sean consistentemente similares en magnitud a nivel espacial y temporal; utilizando las recargas del modelo superficial en el modelo subterráneo.
- Es importante destacar que, a pesar de que en el proceso de acople se debe generar archivos en formato nativo para MODFLOW en tan sólo el primer paso de tiempo, es de suma relevancia realizar esta operación conjunta en el periodo de simulación completo, puesto que ayuda sustancialmente en el proceso de calibración.
- Posteriormente se realiza la vinculación mediante el archivo de enlace entre WEAP y el código de simulación MODFLOW; en aquellos sectores acuíferos en los cuales el modelo subterráneo cuenta con un dominio activo en la malla de modelación.
- Finalmente, con el modelo acoplado, se realiza la calibración de éste, variando parámetros e incorporando aquellas modificaciones topológicas que son consideradas relevantes.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.5-5 Esquema General Metodología de Elaboración de Modelos Acoplados**

### 3.5.3.2 Generación de Archivos MODFLOW Nativo

Para llevar a cabo el enlace entre WEAP y MODFLOW, es necesario generar archivos de modelación subterránea en el formato nativo de MODFLOW, desde los softwares en los que los modelos fueron desarrollados.

Como se detalló en los puntos anteriores, la operación conjunta de WEAP y MODFLOW integra directamente los flujos superficiales y subterráneos, en todos los periodos de simulación, ejecutando simultáneamente un modelo distribuido y otro semidistribuido. De esta manera, en primer lugar, es necesario realizar modificaciones preliminares a los modelos, de manera que cumplan con:

- Modelo subterráneo MODFLOW implementado en régimen transiente.

- El periodo de stress del modelo subterráneo MODFLOW debe ser el mismo utilizado en WEAP.
- Unidades de ambos modelos deben ser: longitud, metros; tiempo, días.

Para cada paso de tiempo, WEAP genera los siguientes archivos y paquetes en formato nativo MODFLOW (detallados en el acápite 3.4.2), que tienen relación con extracciones subterráneas, interacción entre ríos, drenes y recargas superficiales al sistema acuífero.

- Archivo NAM: WEAP entrega este archivo en cada paso de tiempo especificando los nombres de archivos de entrada y de salida, así como los paquetes que deberá utilizar el código MODFLOW.
  - Archivo DIS: contiene la información geométrica de la discretización del acuífero, así como la discretización temporal de los pasos de tiempo.
  - Archivo OC: especifica en qué momento de la simulación y cuáles resultados deben ser guardados en los archivos de salida. Los resultados pueden corresponder a cotas en las celdas, flujo celda a celda y reducción de niveles. Estos pueden ser guardados en los archivos de salida con frecuencia mensual o con frecuencia mayor (se especifican los pasos de tiempo).
  - Paquete RCH: entrega los flujos superficiales distribuidos en el dominio; calculados por el modelo WEAP en cada paso de tiempo y que son ingresados al modelo subterráneo. Se entrega un valor por celda acoplada en unidades de largo/tiempo, las cuales el código MODFLOW pondera por el área de cada celda para obtener las tasas volumétricas que se ingresan en la capa superior del modelo.
  - Paquete RIV: dependiendo de los flujos superficiales calculados por WEAP, así como las curvas de descarga definidas para las secciones de río, WEAP entrega las cotas del río en cada paso de tiempo. Para los valores de cota y conductancia del lecho del río se mantienen los valores iniciales ingresados.
  - Paquete WEL: de acuerdo con los nodos de demanda vinculados a celdas de la componente subterránea y a las tasas volumétricas asignadas a estos nodos, se genera este paquete para cada paso de tiempo; indicando las celdas, los flujos de extracción y las capas desde las que se bombea.
- Por otro lado, WEAP requiere la generación de al menos los siguientes archivos y paquetes nativos, para poder operar el código MODFLOW. El resto de los paquetes MODFLOW mencionados en el acápite 3.4.2.3 son opcionales para la operación del acople WEAP-MODFLOW. Sin embargo, para el enlace entre elementos de río, nodos de demanda correspondiente a pozos de extracción y recargas superficiales a la componente subterránea, se debe contar inicialmente con los paquetes WEL, RIV y RCH, respectivamente.
- Archivo NAM: indica todos los paquetes que serán utilizados por el motor de cálculo MODFLOW.
  - Archivo DIS: se debe contar con la discretización espacial y temporal inicial para el cálculo en MODFLOW, la cual será replicada en cada paso de tiempo por WEAP.

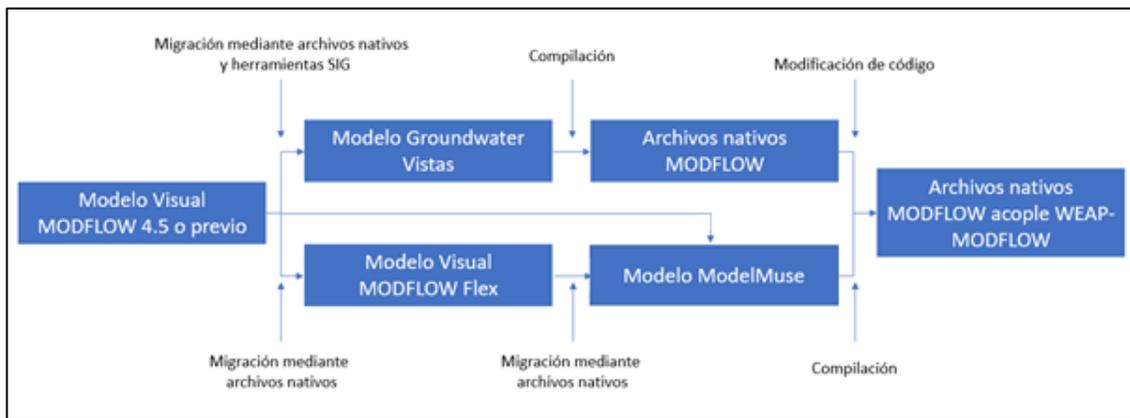
- Paquete BAS6: el paquete Basic especifica las ubicaciones de celdas activas, inactivas y de carga constante, así como las cotas iniciales ingresadas al modelo. Por tanto, el acople WEAP-MODFLOW hace uso de este paquete para el ingreso de condiciones iniciales, así como de configuración de celdas para todos los pasos de tiempo.
- Paquete BCF6/HUF2/LPF/UPW: se debe contar con uno de los paquetes anteriores, de manera que se especifiquen propiedades que controlen el flujo celda a celda, como la permeabilidad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento asignado a cada celda.

De acuerdo a las recomendaciones realizadas por DICTUC (DGA, 2019), como criterio general, se importa el primer paso de tiempo del modelo subterráneo para la generación de archivos nativos, en vías de ser acoplados con WEAP, puesto que contiene la información necesaria para que el modelo opere conjuntamente. Sin embargo, también se exportan los pasos de tiempo totales para verificar la convergencia del modelo subterráneo operando sin plataformas comerciales.

Finalmente, se implementaron las siguientes modificaciones básicas, que ayudaron en la interfaz visual del modelo acoplado:

- Representación de celdas inactivas del modelo con el id "-999", mediante la modificación directa en el paquete BAS6.
- Representación de celdas secas del modelo con el id "-888", mediante la modificación directa en el paquete BCF6/HUF2/LPF/UPW.

Es importante mencionar que de acuerdo a lo descrito por DICTUC (DGA, 2019), cada equipo modelador puede determinar una estrategia propia de generación de archivos nativos, según sea el dominio de los softwares con que se cuenten, para realizar este proceso en el menor tiempo posible. Conforme a lo anterior, y a las consideraciones detalladas en los puntos anteriores, la metodología para generación de archivos en formato nativo, desde los softwares en que éstos fueron desarrollados, se presenta en el esquema de la Figura 3.5-6.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.5-6 Esquema para Generación de Archivos en Formato Nativo MODFLOW**

De esta manera, dependiendo de la plataforma en la cual se desarrolló el modelo subterráneo base, se tienen las siguientes rutas de trabajo.

Modelo Desarrollado en Groundwater Vistas (GWV):

Una vez que el modelo se calibró, se copian los siguientes archivos/paquetes a una nueva carpeta de proceso, según su uso en la conceptualización del modelo base y a las modificaciones propias llevadas a cabo en cada modelo.

- Archivo NAM
- Paquete BAS6
- Paquete DRN
- Paquete BCF6/HUF2/LPF/UPW
- Archivo DIS
- Archivo OC
- Paquete RCH
- Paquete RIV
- Paquete WEL
- Paquete CHD
- Paquete PCG/SIP/NWT

Posteriormente, los paquetes nativos BAS6, BCF6/HUF2/LPF/UPW, DIS y RCH son modificados con un editor de texto, agregando el carácter de espacio " " antes de los segmentos de códigos que presentaron paréntesis, separando estos códigos del número anterior. Lo anterior permite el reconocimiento correcto en WEAP, y su resultado se presenta en el esquema de la Figura 3.5-7.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.5-7 Modificación de Archivos Nativos GWV**

Modelo Desarrollado en Visual MODFLOW (VM):

Se importa el archivo DIS y los paquetes BAS6 y CHD a la plataforma Groundwater Vistas; mediante la opción de importar sets de archivos MODFLOW. Para ello se genera en un editor de texto el archivo NAM, en cuyo contenido se incluyen los nombres de los archivos y paquetes DIS, BAS6 y CHD directamente compilados desde Visual MODFLOW. Los archivos/paquetes: DRN, BCF6/HUF2/LPF/UPW, RCH, RIV y WEL se exportan a capas SIG, desde las cuales son ingresadas a la plataforma Groundwater Vistas. De esta forma, una vez que el modelo se encontró completamente migrado a esta última plataforma, es decir, que fueron verificadas las calibraciones y flujos en zonas de balances conceptualizados originalmente en el modelo Visual MODFLOW, se lleva a cabo el procedimiento descrito para modelos desarrollados en plataforma Groundwater Vistas.

Así también, un procedimiento alternativo consiste en importar los sets de archivos nativos compilados desde Visual MODFLOW a Visual MODFLOW Flex. La plataforma Visual MODFLOW Flex tiene la ventaja de que su estructura de archivos en formato nativo es compatible con la estructura de archivos de la plataforma ModelMuse, por lo que pueden ser importados a esta última directamente. De esta forma, una vez que el modelo se encontró migrado a ModelMuse, y se han verificado las calibraciones y flujos en zonas de balances, conceptualizados originalmente en el modelo Visual MODFLOW, se compilan los archivos en formato nativo MODFLOW, los que quedan directamente disponibles para ingresar a WEAP.

Finalmente, una vez que se generaron los archivos en lenguaje nativo MODFLOW para su acople en la plataforma WEAP-MODFLOW, se verifica que el código MODFLOW entregue resultados estables y coherentes con las calibraciones en las plataformas originales y sus flujos en zona de balance. Esto se lleva a cabo ejecutando directamente el código MODFLOW e ingresando el archivo NAM, de manera que se generen los resultados independientes de las plataformas Groundwater Vistas y ModelMuse. Los resultados son contrastados con lo obtenido en la actualización de los modelos subterráneos.

**3.5.3.3 Generación de Archivo de Enlace y Vinculación de Elementos entre WEAP y MODFLOW**

El acople WEAP – MODFLOW se realiza a través de la lectura desde WEAP de los archivos nativos MODFLOW junto a la construcción de un archivo de enlace que

permite relacionar los elementos que interactúan entre los sistemas superficial y subterráneo.

Los archivos nativos de código MODFLOW deben ser copiados en una sub-carpeta llamada "MODFLOW" dentro de la carpeta del proyecto de manera que puedan ser utilizados por WEAP al momento de realizar la modelación acoplada.

El archivo de enlace corresponde a un archivo en formato \*.shp que relaciona cada una de las celdas del modelo subterráneo (celdas activas como inactivas) a los elementos del modelo WEAP. La Tabla 3.5-3 presenta la estructura del archivo de enlace, en términos generales, de los atributos con los que cuenta. Debido a que los modelos se trabajan en idioma inglés, es necesario que el nombre del atributo se presente de igual forma.

**Tabla 3.5-3 Atributos Archivo de Enlace WEAP - MODFLOW.**

<b>Atributo</b>	<b>Representación topológica</b>
Row	Número de fila asociada a cada celda de la grilla del modelo subterráneo
Column	Número de columna asociada a cada celda de la grilla del modelo subterráneo
Row_Column	Atributo que integra el valor de fila y columna para cada celda
Is_Active	Indica la zona de la grilla que contiene las celdas activas del modelo subterráneo
Catchment	Atributo que permite enlazar las Unidades Hidrológicas del modelo
RiverReach	Enlace de tramos de río
GW	Enlace de elementos-acuífero de WEAP
DEMAND1	Enlace de nodos de demanda
DEMAND2	Enlace de nodos de demanda, en caso de existir más de uno de estos elementos a una misma celda

Fuente: Elaboración propia

#### **3.5.3.4 Vinculación de MODFLOW a modelo WEAP**

Una vez que los archivos nativos MODFLOW se encuentran dentro de la carpeta del proyecto, al igual que el archivo de enlace generado, es posible realizar el procedimiento de lectura desde WEAP de los archivos MODFLOW. Para ello, se debe continuar de la siguiente manera:

- Dirigirse al menú "Avanzado" y seleccionar "Nexo con MODFLOW (flujo Agua Subterránea)"
- Seleccionar la casilla de la opción "Enlace a MODFLOW"

- Seleccionar el motor de MODFLOW utilizado y vincular el archivo \*.nam, correspondiente a uno de los archivos nativos de MODFLOW y que contiene la ubicación del resto de los paquetes generados.
- WEAP presenta una ventana de información referente al estado exitoso o no de la vinculación de los archivos
- Realizar la lectura del archivo enlace mediante "Elegir el shapefile que contiene información de enlaces MODFLOW"
- Especificar el atributo que contiene cada columna del archivo \*shp de enlace

### 3.5.3.5 Calibración del Modelo Acoplado WEAP-MODFLOW

El proceso de calibración del modelo acoplado superficial subterráneo consiste en ajustar los parámetros de asociados a los flujos superficiales, subterráneos, y aquellos que se interrelacionan; reproduciendo como resultado de la modelación matemática los flujos medidos en estaciones fluviométricas, niveles medidos en pozos y flujos subterráneos estimados, desde una perspectiva global en el sistema hidrogeológico.

El proceso de ajuste del modelo subterráneo se realiza en base al cumplimiento de un valor máximo de 5% para los estadígrafos MAE normalizado y RMS normalizado, junto a un valor máximo de 1% de error en el balance para cada periodo de stress, todo ello de acuerdo con la Guía de Modelación del SEA. La generación de los estadígrafos, gráfico de comparación entre niveles piezométricos observados versus simulados y registros en pozos de observación frente al valor simulado, necesarios para el análisis del proceso de calibración tanto en términos estadísticos como de tendencia, se realizan mediante una rutina en código Python construida para el presente estudio.

Respecto al modelo superficial, la verificación del ajuste de la calibración se realizó de manera gráfica, permitiendo estimar la correspondencia de los resultados a la tendencia y estacionalidad de las estaciones fluviométricas, junto a un análisis estadístico entre el registro mediante los siguientes parámetros:

1. **KGE:** Permite un análisis conjunto de la correlación, sesgo y variabilidad de la serie simulada con respecto a la observada. Se tiene que  $KGE \in (-\infty, 1]$ , siendo  $KGE = 1$  un ajuste perfecto (Gupta, 2009). Obtener valores de KGE inferiores a -0,41 indica que la serie promedio de observaciones es mejor modelo predictor que el modelo utilizado para la simulación. El comportamiento simulado se considera adecuado al comportamiento observado cuando los valores de KGE son superiores a 0,3 (Knoben, Freer & Woods, 2019).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

r [-]: Coeficiente de correlación.

$\alpha$  [-]: Relación de variabilidad.

$\beta$  [-]: Relación de sesgo.

- 2. NSE:** Dicho indicador puede ser interpretado como una medida comparativa del modelo con respecto a la media de las observaciones, cuyo rango es  $(-\infty, 1]$ . Obtener valores de *NSE* negativos indica entonces que la serie promedio de observaciones es mejor modelo predictor que el modelo utilizado para la simulación (Gupta, 2009). El comportamiento simulado se considera adecuado al comportamiento observado cuando los valores *NSE* son superiores a 0,5 (Knoben, Freer & Woods, 2019).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

$O_i$  [-]: Valores observados.

$P_i$  [-]: Valores simulados.

$\bar{O}$  [-]: Promedio de los valores observados.

- 3. PBIAS:** Medida porcentual de la tendencia promedio de los datos simulados a subestimar o sobrestimar los datos observados. El valor óptimo se alcanza cuando *PBIAS* = 0. Valores positivos (negativos) indican un sesgo de sobrestimación (subestimación) del modelo (Moriassi, 2007). De esta manera, el valor alcanzado por este indicador entrega el porcentaje de sobrestimación o subestimación.

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad \text{Ec. 15}$$

- 4. r<sup>2</sup>:** Relación entre la dispersión de la serie simulada y la observada. El rango de *r<sup>2</sup>* descansa entre 0 y 1. Un valor 1 indica que la dispersión de la serie simulada es idéntica a la dispersión de la serie observada (Krause, 2005). Los valores entre 0 y 1 representan el porcentaje de la dispersión observada que se toma en cuenta en la simulación.

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

$O_i$  [-]: Valores observados.

$P_i$  [-]: Valores simulados.

$\bar{O}$  [-]: Promedio de los valores observados.

$\bar{P}$  [-]: Promedio de los valores simulados.

Respecto al modelo subterráneo, la verificación del ajuste de la calibración realiza a través del cálculo de los estadígrafos presentados en la Tabla 3.5-4:

**Tabla 3.5-4 Estadígrafos calibración modelo subterráneo**

Parámetro	Fórmula
MAE (m)	$\frac{1}{n} \sum  r_i $
MAE Normalizado (%)	$\frac{MAE}{\max(N_{OBS}) - \min(N_{OBS})}$
RMS (m)	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum r_i^2}$
RMS normalizado (%)	$\frac{RMS}{\max(N_{OBS}) - \min(N_{OBS})}$

Donde:

$r_i$  [-]: Diferencia entre niveles observados y calculados.

$N_{OBS}$  [-]: Niveles observados.

E

#### **3.5.4 Forzantes meteorológicas utilizadas**

Las forzantes meteorológicas utilizadas para la modelación superficial en WEAP, corresponden a los datos generados por el Balance Hídrico (DGA, 2019a). El resultado en detalle se puede consultar en el Subanexo H-2.

Previamente se realizan comparaciones entre los datos observados en estaciones meteorológicas y las variables extraídas del balance, con el fin de validar las forzantes a utilizar en la cuenca de estudio. Para este análisis se consideraron 9 estaciones meteorológicas para el análisis de la precipitación y de 5 estaciones para el análisis de la temperatura, las que se encuentran tanto dentro como fuera de la cuenca, previo análisis de polígonos de Thiessen.

En esta comparación se evalúan, tanto para la precipitación como para la temperatura, el grado de representación estacional del año promedio, magnitudes mensuales, magnitudes anuales y curvas de duración.

Posteriormente, para cada variable hidrometeorológica se seleccionan tres estaciones representativas (una para cada sector) de acuerdo al criterio señalado en el informe "Análisis efecto en el régimen hídrico por cambio en patrones meteorológicos" (DGA, 2016b). Dicho criterio se resume en dar prioridad a las estaciones que poseen mayor cantidad de años de registro, para así obtener una mejor representación de las zonas aledañas a dichas estaciones. El análisis involucra una comparación a nivel gráfico y estadístico para las estaciones seleccionadas. Las estaciones con mejor nivel de información temporal fueron clasificadas como estaciones "indicadoras". Para las

estaciones no seleccionadas como indicadores se realizó exclusivamente un análisis estadístico, con los indicadores, definidos anteriormente, KGE, NSE, PBIAS y  $r^2$ .

Las estaciones indicadoras se exponen en la Tabla 3.5-5, especificando nombre, variable medida, sector, inicio y término de observaciones y ubicación.

**Tabla 3.5-5 Estaciones seleccionadas como "indicadoras" para las cuencas Vertientes del Atlántico**

Nombre	Variable	Sector	Latitud [°]	Longitud [°]	Inicio Obs.	Término Obs.
Monte Aymond	Precipitación	Medio	-52,1644	-69,6078	01-10-1995	01-10-2020
Teniente Merino	Precipitación	Medio	-52,0342	-70,7333	01-01-1984	01-10-2020
Villa Tehuelche	Precipitación	Medio	-52,4414	-71,4022	01-02-1980	01-10-2020
Villa Tehuelche	Temperatura	Medio	-52,4414	-71,4022	01-02-1980	01-10-2020
Monte Aymond	Temperatura	Medio	-52,1644	-69,6078	01-10-1995	01-10-2020
Canal de Trasvase estero Llau-Llau	Temperatura	Alto	-53,125	-70,9358	01-01-2005	01-10-2020

Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que los cuatro índices expuestos anteriormente también son usados para los propósitos de la calibración de los sistemas superficiales y acoplados. Cada indicador comunica una información relevante.

El KGE trata de agrupar en un solo índice el comportamiento de la media, varianza y grado de correlación de la serie. Usualmente un buen KGE se podría obtener entonces con combinaciones de buenos "sub-índices". En general, suele asociarse con un buen indicador de la variabilidad.

Teniendo en cuenta lo anterior, el NSE, permite conocer el ajuste medio de la serie (sea caudal, precipitación, etc), por tanto, complementa la información del indicador anterior, permitiendo comentar respecto de la representatividad del volumen medio de cualquier flujo. Por lo mismo, el coeficiente de determinación  $r^2$ , incorpora otra variable adicional que es la temporalidad. Un buen ajuste de  $r^2$ , permite indicar que se está respetando la estacionalidad del flujo, lo que es complementado con el gráfico de la estacionalidad media.

Finalmente, PBIAS muestra con un número absoluto, si se está sobre o sub estimando la serie original y en qué porcentaje. Es un valor total, por lo que puede haber períodos bajo lo observado y períodos sobre. De ahí la relevancia de mirar estos indicadores con la plataforma gráfica de resultados.

### **3.5.5 Balance Anual y Oferta Sustentable**

#### **3.5.5.1 Balances de agua anuales**

En términos de la demanda solo se consideran los derechos de agua de carácter consuntivo, que generan pérdidas reales del recurso dentro de la cuenca, diferenciando si son de carácter permanente o eventual.

Por lo tanto, los derechos de carácter eventual se relacionan con los caudales con una probabilidad de excedencia de un 5%, mientras que los de carácter permanente se asocian con los caudales con una probabilidad de excedencia del 85%.

#### **3.5.5.2 Actualización de la Oferta Sustentable**

Para la actualización de la oferta sustentable se siguen los lineamientos establecidos en el Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos del DARH.

Para esto, se deben incluir los siguientes puntos:

- Curvas de variación estacional para los puntos de control a considerar.
- Actualizar los derechos otorgados, en trámite, de todo tipo y distribución.
- Actualizar los caudales ecológicos.
- Calcular la oferta hídrica asociando derechos permanentes a un 85% de probabilidad de excedencia y los derechos eventuales a un 5%.

En primer lugar, se establece al igual que antes, como oficial a la división de cuencas hidrográficas de la Dirección General de Aguas, ya que coincide con la distribución espacial de los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y responde a la misma distribución definida en el punto anterior.

Respecto a la información fluviométrica utilizada, se emplean los caudales medios mensuales simulados y naturalizados por el modelo WEAP Punta Arenas y Vertiente Atlántico 2020, en los puntos de control indicados. El rango de años analizados abarca un total de 30 años, lo que cumple con el criterio mínimo recomendado por el DARH.

A partir de lo anterior, se generan las curvas de variación estacional para los cinco puntos de control, identificando el régimen hidrológico que controla cada subcuenca.

Luego, es necesario actualizar y ordenar por tipo, los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales, a partir de la base de datos entregada por el director de la Dirección General de Aguas. Los derechos se distribuyeron por cuenca, expediente, tipo y año, junto con los caudales correspondientes.

Para la actualización de los caudales ecológicos disponibles, existen distintos métodos de determinación según los criterios del DARH, de donde se utiliza:

**Q Ecológico: 50% del caudal mínimo del estiaje del año 95%**

En estos nodos, estaciones fluviométricas o puntos de control se realiza un balance donde se considera lo siguiente:

$$Q_{5\%} - \text{Derechos Eventuales} - Q_{\text{Ecológico}} = \text{Saldo Eventual} \quad \text{Ec. 17}$$

$$Q_{85\%} - \text{Derechos Permanentes} - Q_{\text{Ecológico}} = \text{Saldo Permanente} \quad \text{Ec. 18}$$

### 3.5.6 Análisis de Criterios de Sustentabilidad de Acuíferos

El documento del DARH "Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos" considera como criterio general el caudal de explotación sustentable como el recurso disponible a nivel de la fuente para la entrega de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas. Para ello se han generado criterios de verificación de una explotación sustentable, a nivel de unidades hidrogeológicas (UH) delimitadas (ver Anexo H).

#### 3.5.6.1 Criterios de Sustentabilidad de Acuíferos

Los criterios que permiten verificar la sustentabilidad de la explotación acuífera en cada UH se presentan a continuación.

**Criterio 1:** Descensos sustentables en el tiempo a nivel de sector acuífero.

Se considera que el volumen de afección sobre el acuífero en el largo plazo (50 años) no debe afectar más allá de un 5% del volumen total del acuífero. En caso contrario, el sistema acuífero será considerado con afección y se deberá cerrar el acuífero.

Se considera que un descenso sustentable es aquel no mayor a 1 metro en los últimos 20 años del tiempo de operación total (50 años de simulación), en caso contrario se considera que los descensos son sostenidos.

$$(V_0 - V_{50})/V_0 \leq 0,05 \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

$V_{50}$  = Volumen del acuífero a los 50 años de operación indicado por el modelo

$V_0$  = corresponde al volumen inicial en el acuífero antes de la operación del modelo.

En caso que los descensos sean sostenidos y no se cumpla la condición de cierre para volúmenes, se deberá aumentar la extracción hasta alcanzar la condición del 5%.

**Criterio 2:** Interferencia río acuífero.

Este criterio busca no afectar los recursos superficiales ya comprometidos. El grado de interacción debe ser menor que 10% de los flujos superficiales pasantes en cada una de las zonas, evaluados como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.

La afección sobre el cauce superficial se define como  $\Delta Q$ , término compuesto por dos variables:

- a) Aumento de infiltración en el sector acuífero debido al aumento de la explotación.
- b) Disminución de los afloramientos del río.

$$\Delta Q \leq 10\% Q_{anual,85\%} \quad \text{Ec. 20}$$

**Criterio 3:** Satisfacción de la demanda.

Para cada sector hidrogeológico, el modelo debe permitir una extracción mínima de un 95% del caudal ingresado como demanda y la oferta estará dada por el caudal de los pozos que el modelo indica que son factibles de obtener.

$$Q_{oferta} > 95\% Q_{demanda} \quad \text{Ec. 21}$$

**Criterio 4:** Pozos secos.

En cada sector hidrogeológico no debe haber más de un 5% de pozos desconectados o colgados. En caso contrario el sector quedará cerrado. Esta condición apunta a respetar derechos de terceros sin importar la cantidad que extraiga cada pozo.

$$\frac{N_{\text{pozos secos}}}{N_{\text{total pozos}}} < 5\% \quad \text{Ec. 22}$$

**Criterio 5:** Afección a sectores abiertos.

Verificar que el aumento de extracciones desde un sector no afecte la disponibilidad sustentable desde otro sector aguas abajo. El cumplimiento de este criterio estará dado porque ninguno de los sectores abiertos en que se aumente la demanda provoque el no cumplimiento de los criterios para los otros sectores abiertos, o para los sectores cerrados (dichos criterios para los sectores cerrados se especifican en el siguiente punto).

### 3.5.6.2 Metodología de Aplicación de Criterios de Sustentabilidad de Acuíferos

De manera general, la aplicación de estos criterios se realizó considerando:

- El análisis se realizó a todos los UH que se encuentren acoplados en su totalidad.
- Se analizaron solo los criterios que apliquen a cada UH en particular
- Los escenarios construidos para el análisis de cada criterio corresponden a una extensión de 50 años, considerando el periodo 2000 – 2050.
- Las demandas para el periodo de extensión 2020 – 2050 corresponden a las del año 2019.
- El periodo 2020 – 2050 considera las forzantes climatológicas asociadas al Modelo de Circulación General de cada cuenca.
- Una UH se ha considerado que posee una explotación sustentable solo en caso de cumplir con todos los criterios de sustentabilidad que apliquen.

El caudal de oferta sustentable corresponde al menor valor de explotación que resulte del análisis y cumplimiento de todos los criterios de sustentabilidad que apliquen en cada UH.

### 3.5.7 Indicadores Hídricos de la Cuenca

#### 3.5.7.1 Cobertura demanda

La capacidad sustento de la demanda hídrica por parte de la oferta se evaluará a través de la cobertura de la demanda, correspondiente a la razón entre la demanda teórica y la demanda efectivamente recibida por cada nodo de demanda del sistema.

En particular, desde WEAP es posible extraer estos resultados para cada nodo de demanda definido en el modelo a partir del *Coverage*, el cual corresponde al porcentaje de la demanda satisfecha.

De esta forma, para cada uso se realizará un análisis de la cobertura de demanda con el fin de identificar las zonas del modelo en que la oferta hídrica no es suficiente en comparación con la demanda exigida por el sistema.

#### 3.5.7.2 Índice de Precipitación Estandarizado

El análisis de la precipitación se realizó utilizando el índice de precipitación estandarizado (IPE), definido por McKee et al. (1993) con el objetivo de definir y monitorear las sequías meteorológicas para diferentes escalas de temporales. El indicador se comporta como una variable normal estándar, a partir de la cual es posible efectuar cálculos estadísticos y estimar probabilidades. Para obtener la serie del indicador, es necesaria una serie homogénea de datos de precipitaciones mensuales de al menos 30 años de duración y definir la escala de tiempo en la que se realizará el cálculo.

El IPE utiliza como único parámetro de cálculo la precipitación, agregada de forma mensual, en un periodo recomendado de al menos 30 años. El IPE se define como un valor numérico que representa el número de desviaciones estándar de la precipitación a lo largo de un periodo de acumulación, respecto a la media, una vez que la distribución original de precipitación se ha transformado a una distribución normal. En la Tabla 3.5-6 se muestra el sistema de clasificación utilizado por McKee et al. (1993) para interpretar los valores del índice.

**Tabla 3.5-6 Valores del índice de precipitación estandarizado.**

Valor del IPE	Categoría
$2,0 \leq$	Extremadamente lluvioso
1,5 a 1,99	Lluvioso
1,0 a 1,49	Moderadamente lluvioso
-0,99 a 0,99	Normal o aproximadamente normal
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco

<b>Valor del IPE</b>	<b>Categoría</b>
-1,5 a -1,99	Severamente seco
-2,0 ≥	Extremadamente seco

Fuente: OMM (2012).

El hecho de normalizar la serie histórica permite representar tanto los periodos lluviosos (o húmedos), como los secos. Además, permite interpretar el valor del índice como un periodo de retorno o probabilidad de recurrencia, como se muestra en la Tabla 3.5-7.

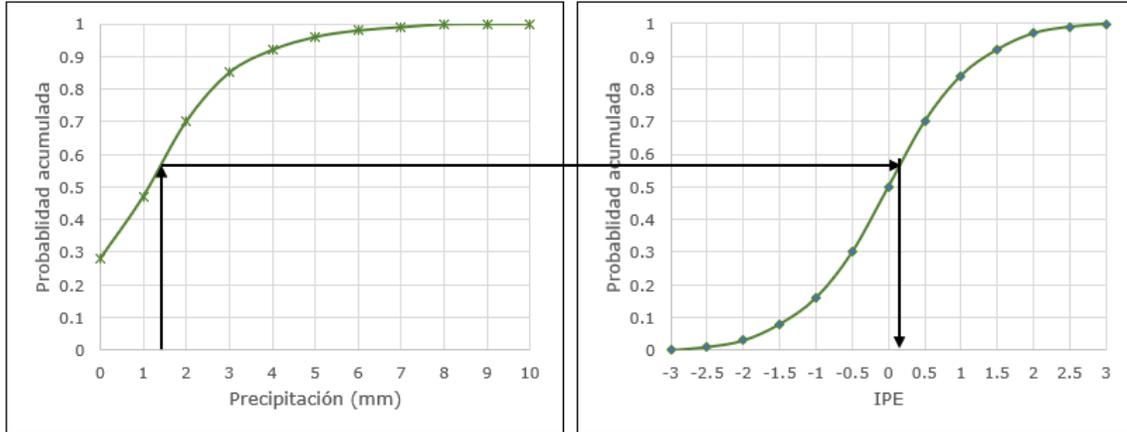
**Tabla 3.5-7 Probabilidad de recurrencia.**

<b>Valor del IPE</b>	<b>Categoría</b>	<b>Nº veces en 100 años</b>	<b>Severidad</b>
-0,99 a 0	Sequía leve	33	1 en 3 años
-1,0 a -1,49	Sequía moderada	10	1 en 10 años
-1,5 a -1,99	Sequía severa	5	1 en 20 años
-2,0 ≥	Sequía extrema	2,5	1 en 50 años

Fuente: OMM (2012).

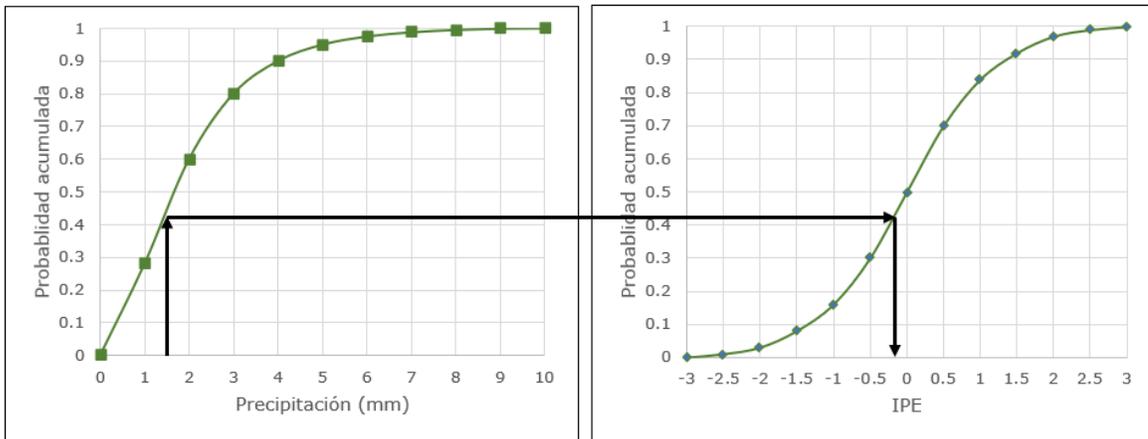
Una ventaja del IPE es que se puede calcular para diversas escalas temporales, lo que permite analizar el comportamiento no solo mes a mes, sino que considerando ventanas de tiempo que consideren los meses previos, de modo de estudiar el comportamiento de la precipitación con mayor flexibilidad. En este estudio, se utilizará un periodo de acumulación de 6 meses, puesto que esta acumulación permite considerar la precipitación entre estaciones, a un mediano plazo y es utilizado en diferentes países para el decreto de sequías. Además, se evita la malinterpretación que se podría dar con periodos de acumulación bajos, donde en meses usualmente secos (verano), ante un año particularmente lluvioso, se pueden interpretar los años secos como sequías y no como una normalidad. Finalmente, un periodo de acumulación de 6 meses evita que en zonas áridas o secas los meses con precipitación nula disminuyan el total de años a considerar para la estandarización y normalización de las series.

El IPE corresponde a una transformación (normalización y estandarización) de la variable de precipitación. Hay que tomar en consideración que las variables hidrometeorológicas en general no son normales y que pueden presentar distribuciones de probabilidad mixtas cuando existe una importante cantidad de valores nulos como ocurre en climas áridos y semiáridos. En la Figura 3.5-8 y Figura 3.5-9 se muestra una representación gráfica para la transformación en el caso de una variable mixta o continua, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.5-8 Transformación de distribución mixta a distribución normal estándar**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.5-9 Transformación de distribución mixta a distribución normal estándar**

Para obtener el valor del IPE a partir de una serie se debe estimar la función de distribución  $H(x)$ . Dado que en zonas áridas y semi áridas es posible encontrar valores nulos de precipitación, la probabilidad acumulada se define a partir de la función mixta  $H(x)$  como:

$$H(x) = 1 + (1 - q) \cdot G(x) \quad \text{Ec. 23}$$

Donde  $q$  es la probabilidad de que la serie de datos tenga un valor nulo y que se puede estimar empíricamente como:

$$q = m/N \quad \text{Ec. 24}$$

Donde  $m$  es la cantidad de valores nulos y  $N$  es la cantidad de valores en la serie. Por otro lado, la distribución de probabilidades  $G(x)$  considera solo los valores que son distintos de cero, por lo que pueden ser menores al total de la serie original. En la formulación original se recomienda utilizar la distribución Gamma de dos

parámetros de límite inferior 0, puesto que esta puede aceptar e incorporar asimetrías. La distribución gamma de dos parámetros tiene como límite inferior de la variable el valor cero, es decir acepta sólo valores positivos y por lo tanto se ajusta bastante bien a valores de precipitaciones. La función de distribución está definida como:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{(\alpha-1)} e^{-x/\beta} \quad , \text{ para } x > 0 \quad \text{Ec. 25}$$

Donde  $\alpha$  ( $>0$ ) es el parámetro de forma,  $\beta$  ( $>0$ ) es el parámetro de escala,  $x$  ( $>0$ ) es el valor de la variable de precipitación o caudales, y  $\Gamma(\alpha)$  es la función gamma definida como:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad \text{Ec. 26}$$

Para el cálculo de esta función se propone la siguiente aproximación para el cálculo de la función gamma:

$$\Gamma(\alpha) = (\alpha + 4.5)^{\alpha-0.5} e^{-(\alpha-4.5)} \sqrt{2\pi} \left[ 1 + \sum_{i=0}^5 \frac{c_i}{\alpha + i} \right] \quad \text{Ec. 27}$$

Donde las constantes  $c_i$ , están definidas como:  $c_0=76,18009173$ ,  $c_1=-86,50532033$ ,  $c_2=24,01409822$ ,  $c_3=-1,231739516$ ,  $c_4=0,12085003 \times 10^{-2}$ ,  $c_5=-0,536382 \times 10^{-5}$ .

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  son estimados para cada serie de precipitación según la escala de tiempo de interés (1 mes, 3 meses, 6 meses, 12 meses, etc.) y para cada mes del año y se pueden estimar usando diferentes métodos, como el método de los momentos o método de máxima verosimilitud. Los parámetros resultantes son usados para determinar la probabilidad acumulada de eventos de precipitación observados, esto para un mes dado y una escala de tiempo determinada. La probabilidad acumulada está dada por:

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^\infty x^{(\hat{\alpha}-1)} e^{-x/\beta} dx \quad \text{Ec. 28}$$

Si  $t = x/\hat{\beta}$  esta ecuación se convierte en la función gamma incompleta:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad \text{Ec. 29}$$

Esta función no puede ser expresada explícitamente en  $x$ , por lo que debe ser evaluada numéricamente. La función se define para valores de  $\alpha$  y  $\beta$  mayores a 0, y valores de  $x$  entre cero e infinito. En resumen, para cada serie mensual

precipitación que dispone de N valores de X, se estiman los parámetros  $q$ ,  $\alpha$  y  $\beta$ , con los cuales se puede calcular para cualquier valor de  $x$  de la función de distribución de valores no nulos  $G(x)$ , y posteriormente la de la serie completa como  $H(x)$  con:

$$H(x) = q \quad \text{si } x = 0 \quad \text{Ec. 30}$$

$$H(x) = q + (1 - q) \cdot G(x) \quad \text{si } x > 0 \quad \text{Ec. 31}$$

Conocida la función de distribución y sus parámetros, para estimar el valor del IPE correspondiente al valor actual de la serie  $x$ , se calcula la probabilidad acumulada  $H(x)$ . Esta probabilidad, es luego transformada a una variable aleatoria normal estándar  $Z$  con media cero y varianza uno, que corresponde al valor de IPE. El procedimiento propuesto por Abramowitz y Stegun, (1965) para la estandarización de la variable, consiste en una aproximación mediante polinomios. La variable estandarizada  $z$  (o IPE) correspondiente a una probabilidad acumulada  $F_z(z)$  se puede aproximar con un error menor a  $4.5 \cdot 10^{-4}$  mediante la siguiente expresión:

$$\text{IPE} = - \left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad \text{Ec. 32}$$

$$\text{IPE} = + \left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0,5 < H(x) < 1 \quad \text{Ec. 33}$$

donde

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad \text{Ec. 34}$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad \text{para } 0,5 < H(x) < 1 \quad \text{Ec. 35}$$

donde  $c_0=2,515517$ ,  $c_1=0,802853$ ,  $c_2=0,010328$ ,  $d_1=1,433788$ ,  $d_2=0,189269$ ,  $d_3=0,001308$

Conceptualmente el IPE representa la cantidad de desviaciones típicas en que un evento se aleja de su valor medio. Sin embargo, esto no es exacto para pequeñas escalas de tiempo en que la distribución de la variable original es muy asimétrica. Por el contrario, el indicador mismo tiene una distribución normal, o normal truncada, de promedio cero y desviación uno, lo que es muy favorable para hacer comparaciones entre distintas estaciones y zonas. El cálculo de este indicador puede ser realizado fácilmente con el paquete SPEI de R, un software de entorno libre para estadística computacional y gráficos.

### 3.6 METODOLOGÍA APLICADA EN EL ANÁLISIS DE ACCIONES

Este capítulo expone la metodología aplicada en el análisis de soluciones a las problemáticas y/o brechas hídricas de la cuenca.

#### 3.6.1 Ejes del Plan de Acción

Para abordar el análisis de las medidas de intervención que forman del presente plan, se ha estructurado en diferentes ejes que agrupan problemas y soluciones atingentes alrededor de una temática específica. Para ello, se ha tenido especial atención en los objetivos específicos del presente estudio (Informe Final, acápite 1.1), los que dan una visión de la propuesta de acciones alcanzada a través del trabajo.

De esta forma, en la Tabla 3.6-1 se presentan los cuatro (4) ejes, con sus correspondientes objetivos, sobre los cuales se estructuraron las iniciativas de acción.

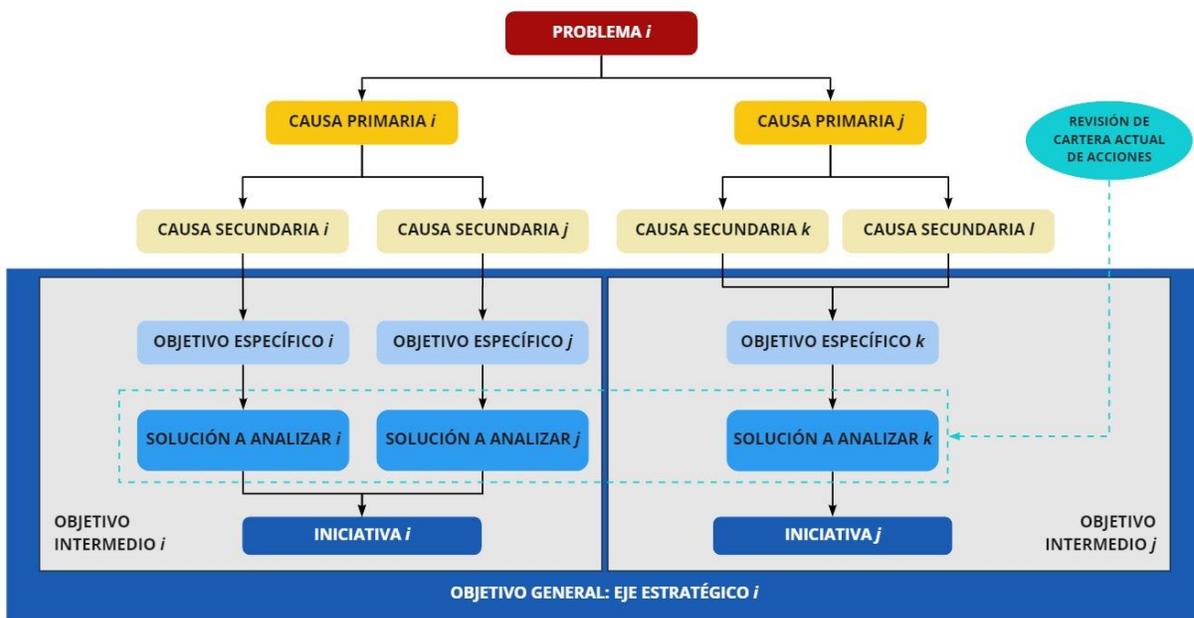
**Tabla 3.6-1 Ejes de formulación del PEGH**

Nº Eje	Nombre del Eje	Nº Obj.	Objetivo para definición de acciones del Plan
1	Uso estratégico del recurso hídrico	1.1	Reducir las brechas entre oferta y demanda de agua considerando cambio climático, sequía e inundaciones
2	Monitoreo del recurso hídrico	2.1	Mejorar el monitoreo de las aguas de la cuenca (superficial, subterráneo, de montaña y glaciares)
3	Gestión y gobernanza del agua	3.1	Promover la conformación de OUA y fortalecer las existentes
		3.2	Promover y revitalizar la alianza público-privada en materia hídrica (gobernanza, plataformas de servicios de información y mercado de DAA)
4	Conservación y protección del recurso y del ecosistema hídrico	4.1	Proteger funciones ecosistémicas críticas relacionadas con los cuerpos de agua superficiales y acuíferos en el tiempo

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.6.2 Árboles de problemas y soluciones

A raíz del diagnóstico del estado de la cuenca, se identifican las brechas encontradas para el cumplimiento de los objetivos específicos del PEGH identificados en la Tabla 3.6-1. La lógica aplicada estuvo basada en determinar las relaciones entre los dichos objetivos, los problemas identificados, las soluciones propuestas y una recopilación de la situación actual de las iniciativas relacionadas con dicho problema, tal como se muestra en la Figura 3.6-1.



Fuente: Elaboración propia en base a (CCG-UC, 2019).

**Figura 3.6-1 Esquema de árbol de problemas y soluciones**

De acuerdo a lo presentado en la Figura 3.6-1, la metodología utilizada permitió analizar un problema presente en el territorio considerando sus principales causales, lo cual facilitó la identificación de las afecciones que estas conllevan sobre algún sector específico de la cuenca o sobre un grupo de actores particulares. Cabe señalar que, de acuerdo a la metodología propuesta por el Centro de Cambio Climático (CCG-UC, 2019) en su trabajo para los Escenarios 2030, un aspecto importante a la hora de definir problemas y causas relacionadas es que estos no deben confundirse con la "ausencia de una solución", sino que se debe enfocar en evidenciar el problema al que se enfrentarán los afectados por dicha "ausencia". Por ejemplo, un problema no es la "inexistencia de un punto de monitoreo fluviométrico", sí lo es la "limitada información sobre los recursos hídricos a nivel cuenca". Debido a lo anterior, desde CCG-UC sugieren que, al profundizar en las relaciones problema-causa, los distintos componentes del árbol deben responder al por qué se producen dichas brechas o situaciones.

Cabe señalar la importancia de las actividades PAC como fuente de discusión y conversación respecto de las causales de los problemas, así como de la definición de los afectados, ya fuese un territorio, un actor o un conjunto de ellos. Este proceso permitió asociar a cada problemática levantada desde el diagnóstico (ej.: limitada información sobre los recursos hídricos a nivel cuenca), factores causales de primer orden (ej.: información hídrica y/o ambiental con brechas en la cobertura espacial y temporal) y de segundo orden, provenientes principalmente desde los actores del territorio (ej.: no hay puntos de monitoreo de nivel aguas superficiales en los cuerpos lacustres relevantes de la cuenca).

Finalmente, una vez identificadas las diferentes causales de los problemas, fue posible establecer una serie de objetivos específicos que permitieron desarrollar soluciones a analizar, las cuales dieron paso a la definición de iniciativas o acciones que pudiesen resolver la problemática identificada. Dichos objetivos específicos se vincularon a un objetivo intermedio, el cual fue previamente establecido como una meta a alcanzar dentro de los objetivos del PEGH. Finalmente, como se presentó en la Tabla 3.6-1, dicho objetivo intermedio se clasificó dentro de un eje estratégico permitiendo diseñar un plan de acción coherente con el diagnóstico.

### **3.6.3 Medidas de intervención**

Así, para el planteamiento de las soluciones que den respuestas a las brechas, se analizaron una serie de aspectos (medidas, soluciones o acciones), las cuales estuvieron enfocadas en planificar problemas relativos a cada uno de los ámbitos (ejes) establecidos en los objetivos, en consonancia a las problemáticas diagnosticadas. Las temáticas analizadas se presentan en la Figura 6.1-3 del Informe Final y en el acápite 3.6.1 del presente Anexo F. A continuación, se presentan las medidas consideradas por eje y objetivo específico.

#### **Eje 1. Uso estratégico del recurso hídrico**

- Objetivo 1.1. *"Reducir las brechas entre oferta y demanda de agua considerando cambio climático, sequía e inundaciones"*:
  - Control de extracciones.
  - Monitoreo de aguas superficiales y subterráneas.
  - Conocimiento hidrogeológico.

#### **Eje 2. Monitoreo del recurso hídrico**

- Objetivo 2.1. *"Mejorar el monitoreo de las aguas de la cuenca (superficial, subterráneo, de montaña y glaciares)"*:
  - Mejoramiento y/o ampliación de la red de monitoreo de aguas superficiales, subterráneas, calidad, glaciológica.
  - Estudio sobre embalse.

#### **Eje 3. Gestión y gobernanza del agua**

- Objetivo 3.1. *"Promover la conformación de OUA y fortalecer las existentes"*:
  - Formación de nuevas Organizaciones de Usuarios hasta su registro en la DGA, fortalecimiento de OU existentes.
- Objetivo 3.2. *"Promover y revitalizar la alianza público-privada en materia hídrica (gobernanza, plataformas de servicios de información y mercado de DAA)"*:
  - Acuerdos Voluntarios de Gestión de Cuencas (AVGC).
  - Fortalecimiento de la coordinación entre usuarios de agua a través de mecanismos específicos.

#### **Eje 4. Conservación y protección del recurso y del ecosistema hídrico**

- Objetivo 4.1 *"Proteger funciones ecosistémicas críticas relacionadas con los cuerpos de agua superficiales y acuíferos en el tiempo"*:
  - Medidas de conservación.
  - Control de extracciones.

- Mejoramiento y/o ampliación de la red de monitoreo de aguas superficiales, subterráneas, calidad, glaciológica.

Cabe señalar que las medidas pueden responder a más de un objetivo e incluso a más de un eje. El análisis preliminar de medidas se contrastó y/o complementó con las iniciativas ya catastradas e identificadas en la fase de diagnóstico de la cuenca, respecto de la revisión de la Cartera de Acciones.

### **3.6.4 Categorización de las acciones del Plan**

A raíz de los puntos descritos anteriormente se establecieron las estrategias para la gestión de las brechas encontradas, mediante la generación de un portafolio de acciones.

Las acciones se han clasificadas según su tipología, siguiendo las recomendaciones indicadas por DGA, en cuatro (4) tipos, analizando las siguientes temáticas:

- **Obras hidráulicas (OH):**
  - Embalses
  - Infraestructura de riego y tecnificación
  - Infraestructura de agua potable y tratamiento de aguas servidas
  - Infraestructura de defensa fluvial
  - Red hidrométrica de la DGA
- **Medidas de gestión (MG):**
  - Fortalecimiento y formalización OUA
  - Capital humano
  - Recuperación de acuíferos
  - Gobernanza
  - Sistemas de Información
  - Constitución de reservas
  - Tecnologías habilitantes
  - Mejoras de eficiencia
- **Nuevas fuentes de agua (NF):**
  - Desalinización
  - Acuíferos profundos
  - Recarga artificial de acuíferos
  - Cosecha aguas lluvia
  - Reúso de aguas servidas
- **Otras medidas (OM):**
  - Conocimiento en materia hídrica

A su vez, las acciones de gestión tienen establecidos los plazos de implementación, considerando iniciativas:

- a corto plazo (> 5 años);
- a mediano plazo (5-10 años); y
- a largo plazo (< 10 años).

Las soluciones son segregadas según quien se identifique inicialmente como responsable de las mismas, siendo éstas:

- medidas de intervención DGA;
- medidas de intervención de otros organismos del Estado;
- medidas de intervención de privados; o bien,
- medidas de intervención mixtas, esto es, alianzas público-privadas (APP o PPP, *public-private partnership*).

Finalmente, para cada acción se generó una ficha resumen con el contenido y la estructura mostrada en la Tabla 3.6-2, la que comprende:

- identificación;
- problemática y objetivo;
- características;
- relación con el PEGH y cartera existente;
- observaciones; y
- ubicación.

**Tabla 3.6-2 Ficha resumen identificativa de las acciones del plan**

<b>Identificación</b>	<b>ACCIÓN N°:</b>
	<b>Nombre de la Acción:</b>
<b>Problemática y Objetivo</b>	<b>Brecha o problemática identificada:</b>
	<b>Objetivo(s) de la Acción:</b>
<b>Características</b>	<b>Tipología(s) de la Acción:</b>
	<b>Características generales:</b>
	<b>Ámbito:</b>
	<b>Ubicación:</b>
	<b>Beneficiarios directos:</b>
	<b>Tipo de acción:</b>
	<b>Situación de la acción:</b>
	<b>Horizonte:</b>
	<b>Tipo de financiación:</b>
	<b>Monto estimado VAC (UF):</b>
	<b>Entidad(es) financiadora(s):</b>
	<b>Entidad(es) responsable(s):</b>
	<b>Descripción de la Acción y/o especificaciones técnicas:</b>
<b>Relación con el PEGH y cartera existente</b>	<b>Eje(s) del Plan:</b>
	<b>Objetivo(s) del Plan:</b>
	<b>Relación con Políticas y/o Cartera de acciones actual:</b>
<b>Observaciones</b>	<b>Requisitos habilitantes y/o comentarios adicionales:</b>
<b>Ubicación</b>	<b>Ubicación de la acción:</b>

Fuente: Elaboración propia.

### **3.7 METODOLOGÍA APLICADA EN LA CARTERA DE INICIATIVAS PROPUESTAS**

El presente capítulo la metodología aplicada para la formulación de la cartera de iniciativas propuestas en el presente Plan, con la evaluación económica, social y ambiental, así como la priorización, la valorización y el cronograma propuesto para la implementación.

#### **3.7.1 Síntesis de la selección de alternativas**

La síntesis del diagnóstico realizado en la etapa de análisis de acciones, junto con la revisión de la cartera actual de acciones derivan en iniciativas estratégicas, las cuales son clasificadas según su tipología (OH, MG, NF, OM) y levantadas con su información asociada en una ficha resumen (acápites CAPÍTULO 1). Una vez realizada esta identificación y clasificación, se efectúa la evaluación de las iniciativas y posterior priorización.

#### **3.7.2 Metodología para la evaluación y priorización de medidas**

A continuación, se entrega la metodología de evaluación de las iniciativas identificadas para el PEGH. Esta consta de la evaluación integral, en sus componentes económica, social y ambiental; en el acápite 3.7.2.4 se expone la metodología de priorización de iniciativas del plan.

##### **3.7.2.1 Evaluación económica**

La evaluación económica de las iniciativas pretende determinar los costos asociados a través de un enfoque de costo-eficiencia. Es importante mencionar que se utiliza información referencial respecto a los costos, tomando en consideración la información pública respecto del gasto público y/o privado en estas materias.

El enfoque costo eficiencia tiene como supuesto implícito que el valor actual de los beneficios sociales de la medida es mayor que el valor actual de los costos de implementarla, por lo cual dicha medida es de por sí socialmente rentable y no se evalúa su conveniencia. Bajo este enfoque de evaluación se utilizará como indicador el **valor actual de costos o VAC**.

El VAC es ampliamente utilizado cuando se comparan alternativas de proyecto que tienen los mismos beneficios y vida útil, o cuando los beneficios son difíciles de cuantificar. Toma especial relevancia en el presente ejercicio, para poder comparar medidas e iniciativas que tienen una gran componente de gestión y procesos, que, si bien no es posible atribuirles beneficios directos o externalidades valorables, sí contribuyen a que el PEGH obtenga información de base o genere capacidades necesarias para la implementación del plan y que se logren los objetivos de este. Se debe resaltar que la mayoría de las iniciativas habilitantes o de procesos, tienen este perfil, siendo solo algunas iniciativas que requieren una inversión en infraestructura.

Luego, para poder comparar las iniciativas, se utiliza el indicador VAC que se expresa como la suma algebraica de cada flujo de costos descontados, y representa el costo total del proyecto evaluado en valor presente. Su expresión matemática es la siguiente.

$$VAC = I_o + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad \text{Ec. 36}$$

donde,

**VAC:** Valor actual de los costos;

**Ct:** Costos sociales del proyecto, basados en información referencial;

**I<sub>o</sub>:** Inversión inicial, basada en información referencial;

**r:** Tasa social de descuento (expresada en términos reales);

**T:** Horizonte de evaluación del proyecto.

Si se compararan alternativas que compiten entre sí, en el cumplimiento de un mismo beneficio, el criterio de decisión es seleccionar aquella alternativa que tenga el menor VAC.

Adicionalmente, se estima el indicador de **costo anual equivalente o CAE**. La expresión matemática del CAE corresponde a la siguiente:

$$CAE = VAC \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \quad \text{Ec. 37}$$

donde,

**CAE:** Costo anual equivalente;

**VAC:** Valor actual de los costos;

**r:** Tasa social de descuento (expresada en términos reales);

**T:** Horizonte de evaluación del proyecto.

Finalmente, si existen antecedentes suficientes, se puede aplicar la razón de costo efectividad estimada como la división entre el CAE y un indicador de beneficio, como puede ser el número de beneficiarios (B), el aumento de seguridad de ejercer el derecho de agua, o el aumento en la disponibilidad del recurso hídrico en l/s. Si la intención es comparar proyectos, el indicador de beneficio debe ser el mismo para todas las iniciativas. El criterio de decisión es seleccionar o priorizar aquellas alternativas que tengan el menor CAE por unidad de beneficio. Para el presente PEGH no se aplicó este análisis puesto que un Plan de estas características no tiene el mismo indicador de beneficios para todas las medidas.

Para la priorización de las iniciativas del PEGH desde el punto de vista de la evaluación económica, se ha considerado la clasificación y la puntuación recogida en la Tabla 3.7-1.

**Tabla 3.7-1 Escala de evaluación económica: indicador de CAE normalizado**

<b>Categoría de CAE</b>	<b>Descripción</b>	<b>Puntaje</b>
Bajo	CAE normalizado superior al 80% del valor máximo de CAE: [máx. CAE a 0,8% máx. CAE]	1
Medio	CAE mayor a la mediana de los CAE de todas las iniciativas y menor o igual al valor máximo de CAE: ]0,8% máx. CAE - mediana CAE]	2
Alto	CAE igual o menor a la mediana de los CAE de todas las iniciativas: ]mediana CAE - mín. CAE]	4

Fuente: Elaboración propia.

### 3.7.2.2 Evaluación social

La evaluación social considera la opinión de los asistentes a las reuniones y talleres de la actividad de Participación Ciudadana, donde los actores han identificado y priorizado las brechas que consideran más relevantes y medidas atingentes, frente a aquellas soluciones que no consideran oportunas o que causan rechazo.

Para la priorización de las iniciativas desde el punto de vista de la evaluación social, se ha considerado la clasificación y la puntuación recogida en la Tabla 3.7-2.

**Tabla 3.7-2 Escala de evaluación social: indicador de problemáticas PAC**

<b>Categoría de validación PAC</b>	<b>Descripción</b>	<b>Puntaje</b>
Bajo	Iniciativa validada "en desacuerdo" con porcentaje de votos mayor o igual al 20%.	1
Medio	Iniciativa validada "de acuerdo" con porcentajes de votos igual o menor al 80% y con porcentajes de votos "en desacuerdo" menor al 20%.	2
Alto	Iniciativa validada "de acuerdo" con porcentaje de votos mayor al 80%.	4

Fuente: Elaboración propia.

### 3.7.2.3 Evaluación ambiental

La evaluación ambiental recoge los aspectos principales en materia medioambiental del proyecto propuesto. Este se ha definido en un indicador de evaluación relativo al impacto en la protección y conservación de los recursos, aportando al Eje 4 del PEGH. Para dicho indicador de impacto, se considera la Tabla 3.7-3 de puntuación para la evaluación ambiental.

**Tabla 3.7-3 Escala de puntuación para evaluación ambiental**

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Puntaje</b>
Bajo	Acciones con la comunidad que tienen un impacto indirecto de protección y conservación de los recursos naturales	1
Medio	Programas, obras de mejora y monitoreo, que tienen un impacto indirecto de protección y conservación de los recursos naturales	2
Alto	Proyectos o acciones con incidencia directa en protección y conservación en recursos naturales	4

Fuente: Elaboración propia.

#### **3.7.2.4 Priorización de las medidas**

Para la priorización de medidas se utiliza una aproximación de la metodología de Análisis Multicriterio para la Toma de Decisiones (MCDM, por sus siglas en inglés). Este método ha sido estudiado por la DOH para la priorización de infraestructura hidráulica, específicamente cuando se toman decisiones de inversión de un conjunto de iniciativas que contemplan el mismo producto estratégico de la DOH (tipo de obra). Para el presente ejercicio se aproxima la metodología para poder comparar iniciativas de gestión, que incluyen medidas habilitantes, de procesos y de inversión en obras menores y mayores.

Para ello, a continuación, se detallan los pasos generales a considerar en el análisis multicriterio.

1. Identificar opciones a ser evaluadas: Consiste en determinar los actores relevantes del problema, evaluar los objetivos del proyecto y, en base a lo anterior, determinar cuáles son las opciones con las que se cuenta actualmente. Esta identificación se basa en el trabajo realizado en las actividades de la PAC, las modelaciones, y la opinión técnica del equipo de expertos del estudio.
2. Identificar criterios y objetivos: En esta etapa se pretende identificar aquellos criterios que se van a considerar, de forma que las opciones del problema estén reflejadas en estos. Además, en esta etapa se deben jerarquizar los criterios en grupos de acuerdo al nivel de importancia y características de estos. Es importante revisar que los criterios identificados concuerden con los objetivos del proyecto, para lo cual se debe tener en cuenta: viabilidad técnica, eficiencia económica, desarrollo y planes estratégicos del proyecto. Para ello, en el presente ejercicio se consideran como criterios de desarrollo las evaluaciones ambientales, social, y económica antes descritas, agregando un criterio estratégico que se refiere a la temporalidad y relevancia de la iniciativa bajo la opinión experta.

3. Determinar variables a considerar de acuerdo con criterios previamente establecidos: Consiste en identificar las opciones con las que se cuenta, definir una forma de llevar estas opciones a variables medibles (indicadores) y determinar las puntuaciones de cada una de estas opciones de acuerdo a los criterios previamente establecidos. Para este paso, se consideran los indicadores económicos de costo-eficiencia de las iniciativas y los indicadores ambientales y sociales descritos en las secciones previas.
4. Asignar promedios ponderados a cada variable de acuerdo a importancia relativa, que en el presente ejercicio se hace a través del proceso analítico jerárquico (AHP). Este método requiere que el tomador de decisiones proporcione tanto evaluaciones como preferencias subjetivas con respecto a la importancia relativa de decisión para cada criterio. El resultado del AHP corresponde a una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada alternativa de decisión. Dado que es el tomador de decisiones quien determina, mediante sus juicios de valor, conocimientos y experiencia previa, las ponderaciones de cada criterio en el modelo, el AHP requiere de la participación de representantes de todos los estamentos relacionados con la toma de decisión. Más abajo se expone el modelo matemático para obtener las ponderaciones finales a ser utilizada.
5. Combinar ponderaciones y calificaciones de cada opción de forma de obtener un valor global: En esta etapa se debe establecer que método de combinación se va a utilizar para agrupar los indicadores. Hasta el momento se considera el método de ponderación aditiva simple (SAW), conocido como método de combinación o puntuación lineal ponderada. Es una técnica de decisión multicriterio y se basa en el promedio ponderado. Corresponde a uno de los métodos más simples y se utiliza muy a menudo en métodos de decisión a través de técnicas multicriterio. El modelo matemático corresponde a:

$$u_i = \sum_{j=1}^m r_{ij}w_j \quad \text{Ec. 38}$$

Donde la utilidad  $u_i$  es el resultado de la suma ponderada de los criterios  $w_j$  y sus ponderaciones relativas  $r_{ij}$ . Luego se aplica un criterio de maximización de utilidades, donde los mayores valores de la utilidad ( $u_i$ ) son las mejores alternativas.

6. Finalmente se deben examinar los resultados obtenidos.

Respecto al proceso analítico jerárquico (AHP), se debe aclarar que es una metodología de análisis multicriterio, cuya principal ventaja es que considera la posibilidad de incluir datos cualitativos que, generalmente, no se consideran en los análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero suelen ser relevantes en algunos casos. El modelo matemático para determinar las ponderaciones de los criterios contempla los siguientes cuatro pasos.

1. El tomador de decisión define la matriz de comparación por pares, P, donde los valores  $p_{ij}$  corresponden a la importancia relativa del criterio i-ésimo con respecto del criterio j-ésimo, en una matriz como la siguiente.

$$P = \begin{bmatrix} 1 & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & 1 & \dots & p_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

2. En el proceso de comparación, una vez determinada la matriz singular superior, se puede obtener la matriz triangular inferior mediante la siguiente ecuación

$$p_{ji} = \frac{1}{p_{ij}}$$

3. Luego, para obtener la matriz de comparación de pares normalizada, X, se debe dividir cada elemento en P por la suma de sus columnas, como sigue:

$$X = \begin{bmatrix} 1/\sum_{m=1}^m p_{m1} & \dots & p_{1m}/\sum_{t=1}^m p_{tm} \\ \dots & \dots & \dots \\ p_{m1}/\sum_{m=1}^m p_{m1} & \dots & 1/\sum_{t=1}^m p_{tm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & x_{mm} \end{bmatrix}$$

4. Para obtener el vector de ponderaciones de los criterios (W), se deben promediar las filas de la matriz X.

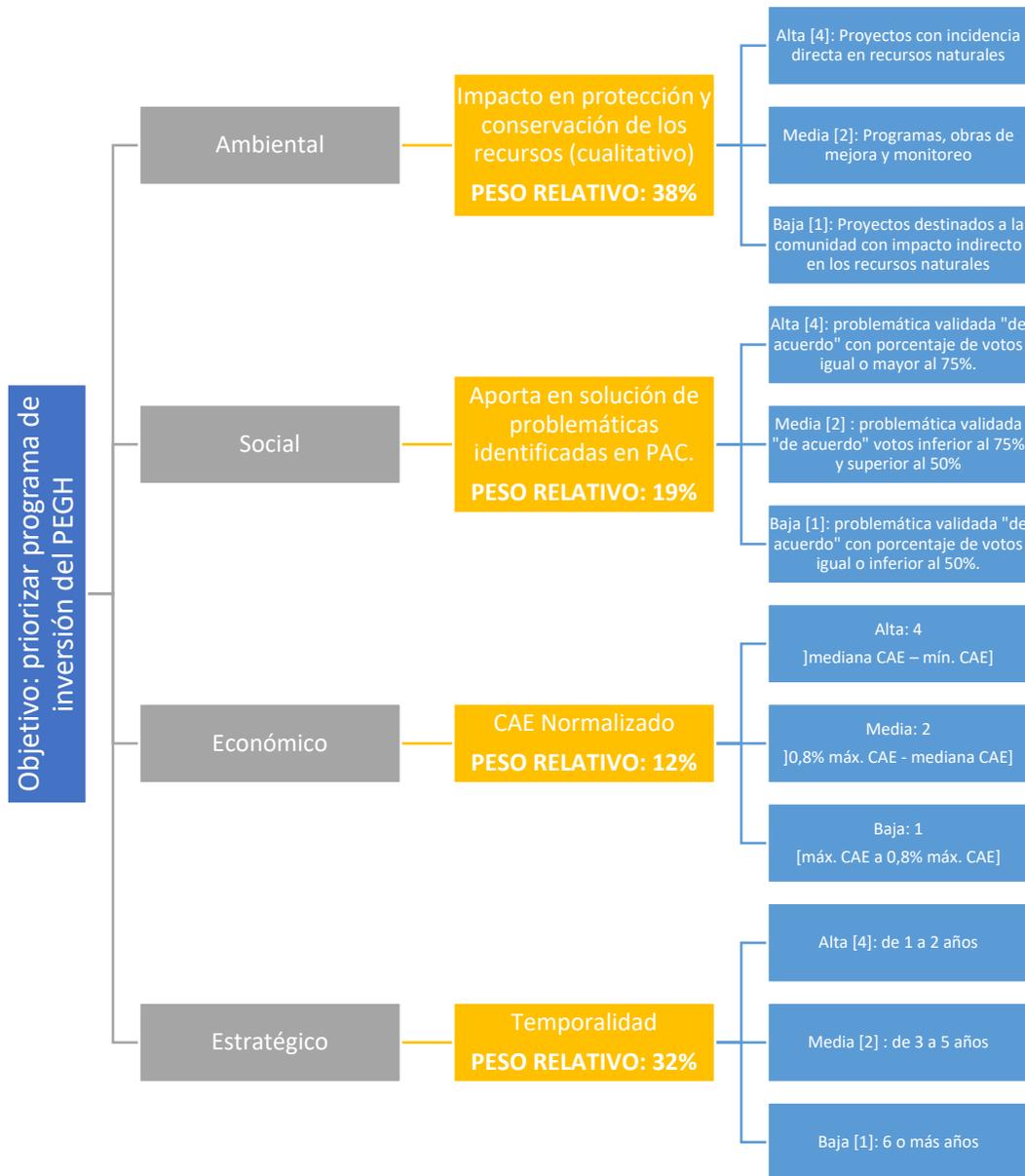
$$W = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^m x_{1m} \\ \dots \\ \sum_{t=1}^m x_{tm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \\ \dots \\ w_m \end{bmatrix}$$

En la ecuación anterior, el término  $w_j$  ( $j= 1, \dots, m$ ) corresponde a la ponderación relativa del criterio j y la suma de las ponderaciones de los criterios debe ser 1.

El resultado de la priorización permitió entregar un ranking para la implementación de las medidas seleccionadas para el PEGH. En resumen, el presente ejercicio consideró: los resultados de las evaluaciones social, económica y ambiental descritos previamente, otorgando una escala de puntuación; más un criterio estratégico asociado a la urgencia temporal de implementación; y, las ponderaciones abordadas desde la opinión experta de los tomadores de decisión a través del método AHP.

Finalmente, los resultados se presentaron en una tabla de priorización (Anexo K.3), en la cual se ordenaron los puntajes del ranking de mayor a menor valor, y se destacaron en color verde aquellas iniciativas cuyos puntajes se encuentran dentro del 40% superior del rango de valor de priorización máximo y mínimo calculado.

En la Figura 3.7-1 se presenta el esquema de priorización y los pesos relativos. Como se aprecia, el indicador asociado al criterio ambiental se presenta con el mayor porcentaje relativo de 38%, seguido del indicador estratégico con un 32%, mientras que el indicador social se presenta con un 19% y el económico con un 12%. Se debe mencionar que las ponderaciones son subjetivas al grupo de expertos que participa en la aplicación del modelo de jerarquización AHP. En futuras aplicaciones se puede considerar un grupo más amplio de tomadores de decisión, incluyendo por ejemplo actores del Ministerio de Desarrollo Social y del Gobierno Regional.



Fuente: Elaboración propia.  
**Figura 3.7-1 Esquema de priorización de las acciones**

### **3.7.3 Valorización económica del PEGH**

La valorización económica del PEGH corresponde a la identificación del monto total asociado al VAC y CAE de las iniciativas del Plan de Acción, así como consideraciones y estrategias de financiamiento.

Cada una de las iniciativas contiene la identificación de la entidad financiadora y la entidad responsable, de forma de establecer la gobernanza asociada al PEGH. En lo relativo a su sostenibilidad, se establece el presupuesto correspondiente a cada administración implicada, ya sea un actor público o privado. Se compila así, mediante tablas resumen, las iniciativas a ejecutar por DGA diferenciadas de aquellas a cargo de otras instituciones, incluyendo valores totales por cada una de las entidades financiadoras propuestas, con apoyo de gráficos de torta.

### **3.7.4 Metodología para la generación del cronograma de las soluciones**

El cronograma de las soluciones corresponde a la generación de la hoja de ruta asociada a cada una de las iniciativas, identificando los horizontes (corto, mediano y largo plazo), clasificando las acciones según su tipología (OH, MG, NF, OM) e identificadas por código y nombre.

## **3.8 METODOLOGÍA APLICADA EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN**

En el presente capítulo se presentan la metodología aplicada a la implementación del PEGH, comenzado con un resumen de los principales hitos identificados en la implementación del Plan de Acción, seguido de algunas directrices a considerar para el éxito del Plan de Acción, relativo a la estrategia de implementación y comunicacional, para finalizar con un resumen con la identificación de las fuentes de financiación previstas.

### **3.8.1 Hitos de referencia en la implementación del plan**

Se incluye, en primer lugar, un resumen de la estructura del Plan en la relación a: i) ejes, y ii) tipología de acciones. Seguidamente se presentan los principales hitos a cada uno de los horizontes del Plan (corto, mediano y largo), identificando iniciativas clave en cada caso.

### **3.8.2 Estrategia de implementación**

La estrategia de implementación aborda dos aspectos:

- i) Aspectos condicionantes y/o requisitos habilitantes. Se abordan las siguientes temáticas: aspectos institucionales, de cultura del agua, de financiamiento y normativos, describiendo las consideraciones relevantes en cada caso por tipología de acción prevista en el Plan.
- ii) Pasos en la implementación. Comprende una propuesta de implementación del Plan de Acción, abordando responsabilidades y gobernanza en las diferentes escalas: nivel de coordinación (ejecución del PEGH) y nivel técnico (implementación de acciones, y monitoreo y seguimiento).

### **3.8.3 Estrategia de comunicación**

La estrategia de comunicación comprende aquellas estrategias de comunicación y difusión del PEGH en dos estadios: i) síntesis de acciones ejecutadas durante el desarrollo del estudio; y ii) propuesta de estrategia para fases posteriores a la elaboración del Plan.

### **3.8.4 Identificación de fuentes de financiamiento del Plan**

La identificación de fuentes de financiamiento corresponde a una tabla de síntesis de distribución de costos según mandante (DGA, DGA junto con otras instituciones, y otras instituciones) con montos de VAC y CAE, en unidades de UF.

## **3.9 METODOLOGÍA APLICADA EN EL MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL PLAN**

En este capítulo se detalla la metodología aplicada al Monitoreo del PEGH, así como los mecanismos para análisis y toma de decisiones asociados.

### **3.9.1 Programa de seguimiento y control del Plan**

Las pautas del programa de seguimiento y control del PEGH se han establecido en un Plan de Monitoreo, con el objetivo de verificar la eficacia de las acciones efectivamente implementadas, a través de la definición de indicadores de cumplimiento.

Adicionalmente, para realizar la evaluación de las iniciativas propiamente tal, se han definido en cada caso, siempre que sea posible:

- **Indicadores de producto:** dan cuenta del grado de cumplimiento de las iniciativas planificadas.
- **Indicadores de impacto:** permiten evaluar los resultados de las ejecuciones de las iniciativas respecto de las problemáticas o brechas existentes.

En el establecimiento de indicadores del PM, se han considerado experiencias anteriores en planificación hídrica; específicamente, se ha tomado como referencia principal el último instrumento de características similares promovido por la DGA, correspondiente al estudio DGA (2013).

Así, los indicadores considerados son:

- Indicadores Generales: PIC, PICa, PIF y PIFa.
- Indicadores Específicos.

A su vez, para realizar el seguimiento del PEGH propiamente tal, se han definido una serie de conceptos adicionales:

- Parámetro de referencia.
- Umbrales.
- Frecuencia de revisión.

Consecuentemente, seguidamente se detallan los siguientes indicadores, de tipo general y específicos, así como otros conceptos a tener en cuenta:

- **Indicadores Generales.** Cuantifican el grado de avance del PEGH a nivel global, considerando la relación existente entre iniciativas comenzadas y/o finalizadas versus la programación planificada según la carta Gantt. Considera 4 indicadores:
  - Porcentaje de iniciativas comenzadas (PIC). Se calcula como el cociente entre el número de iniciativas comenzadas en el año *i* y el número de iniciativas planificadas en el año *i*.
  - Porcentaje de iniciativas comenzadas acumulada (PICa). Se calcula como el cociente entre el número de iniciativas comenzadas hasta año *i* y el número de iniciativas planificadas hasta el año *i*.
  - Porcentaje de iniciativas finalizadas (PIF). Se calcula como el cociente entre el número de iniciativas finalizadas en el año *i* y el número de iniciativas planificadas en el año *i*.
  - Porcentaje de iniciativas finalizadas acumulada (PIFa). Se calcula como el cociente entre el número de iniciativas finalizadas hasta año *i* y el número de iniciativas planificadas hasta el año *i*.
  
- **Indicadores Específicos.** Dan cuenta del porcentaje de avance de la implementación de las iniciativas clave del Plan de Acción.
  - Porcentaje de avance iniciativa N°1. Se calcula como el cociente entre el avance real y lo planificado. Este cálculo se obtiene a partir de la carta Gantt específica de la iniciativa 1, cronograma que debe confeccionarse al momento de comenzar el proyecto en particular. Adicionalmente este indicador tiene definido un tiempo máximo para su implementación.
  - Porcentaje de avance iniciativa N°2. Se calcula como el cociente entre el avance real y lo planificado. Este cálculo se obtiene a partir de la carta Gantt específica de la iniciativa 2, cronograma que debe confeccionarse al momento de comenzar el proyecto en particular. Adicionalmente este indicador tiene definido un tiempo máximo para su implementación.
  
- **Parámetro de referencia.** Para los indicadores generales representa el número de iniciativas totales por año que deben ser comenzadas o finalizadas para dar cumplimiento en un 100% a la planificación del PEGH. Para los indicadores específicos representa el tiempo al cual la iniciativa debe estar 100% implementada. Este parámetro es sólo referencial y ayudan a la determinación de los umbrales del PM.
  
- **Umbrales.** Los umbrales corresponden a los valores de avance mínimos aceptados para cada tipo de indicador.
  
- **Frecuencia de revisión y Plan de Acción.** El PM debe tener en cuenta las posibles revisiones del PEGH, de acuerdo a una frecuencia establecida y siguiendo un Plan de Acción fijado, según se detalla a continuación:
  - El PM considera el seguimiento de la implementación de las iniciativas durante los primeros cinco años, a través de los indicadores descritos anteriormente. Sin embargo, se considera la aplicación de un Plan de

Acción, en caso de ser necesario, hasta el cuarto año. Lo anterior debido a la realización de una evaluación y rediseño del plan en su conjunto durante el quinto año, donde una de las variables a evaluar y rediseñar es el PM.

- Si la evaluación realizada a través del PM indica que no se han cumplido con los umbrales definidos, es decir, existen desviaciones importantes respecto de lo planificado, se ejecutará un plan de acción, que tiene por objetivo replanificar el PEGH de modo de cumplir con los objetivos propuestos en los tiempos propuestos.

Además, se establecen mecanismos para la potencial reformulación del PEGH.